



Miguel Fernandes Moita

Licenciado em Ciências de Engenharia Física

Desenvolvimento de um Head-Mounted Display Estereoscópico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientador: Yuri Fonseca da Silva Nunes, Professor
Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Ivo Vieira, Director da Lusospace

Júri:

Presidente:	Doutor Orlando Manuel Neves Duarte Teodoro
Arguente:	Doutor Dawei Liang
Vogais:	Doutor Yuri Fonseca da Silva Nunes
	Doutor Ivo Yves de Matos Pereira Vieira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2013

Copyright

Copyright©2013 – Todos os direitos reservados. Miguel Fernandes Moita. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Pasma sempre quando acabo qualquer coisa. Pasma e desolo-me. O meu instinto de perfeição deveria inibir-me de acabar; deveria inibir-me até de dar começo. Mas distraio-me e faço. O que consigo é um produto, em mim, não de uma aplicação de vontade, mas de uma cedência dela. Começo porque não tenho força para pensar; acabo porque não tenho alma para suspender. Este livro é a minha cobardia.”

Fernando Pessoa, *O Livro do Desassossego*

Agradecimentos

Ao Professor Yuri Nunes, meu orientador, pelo apoio, partilha de conhecimentos, palavras de incentivo e boa disposição.

Ao Ivo Vieira pela oportunidade de realizar a minha tese na Lusospace que me fez evoluir bastante a nível pessoal e profissional.

A Doutora Susana Sério, Diogo, Faustino e Juscelino que sempre me receberam bem no laboratório e me ajudavam sempre a procurar o meu orientador.

Ao Sr. Mesquita pela ajuda nas soldaduras e disponibilidade enquanto andei a trabalhar na sala de projecto e estágio.

Aos meus colegas Luís, Sara, Tânia, Diogo, Isabel, Tiago e Mónica, pelos bons momentos no decorrer do curso, apoio, amizade, camaradagem e cumplicidade. Um especial à Sara e ao Luís que foram os que mais estiveram presentes durante a execução deste projecto e mais aturaram as minhas rabugices quando as coisas não corriam bem. A partilha de ideias e discussões com eles foram essenciais para a concretização deste projecto. Um especial também para a Mónica que fez comigo a tese na Lusospace o que tornou o estágio na empresa bem mais animado.

A todas as pessoas que trabalham na Lusospace nomeadamente o Romeu pelos conhecimentos de óptica, Renato em programação, Ricardo e Bruno Rosa em electrónica e por me terem ensinado a soldar como deve de ser, à Filipa e Bruno Couto pelo apoio, e a todos os outros, Carla, David, Rui e Rodrigues. Todos eles me fizeram sentir em casa logo desde o início.

Às minhas cobaias que se disponibilizaram para realizar os testes, Luís, Sara, Tânia, Mónica, Filipa e Bruno Couto.

Aos meus amigos da Figueira da Foz, Kiko, Pedro, Miguel, Inês, Luís, Blind e a tantos outros que sempre me receberam de braços abertos e me faziam descontraír depois de semanas duras de trabalho. Os laços criados na Figueira jamais se perderão e é lá que sempre me sentirei em casa.

A minha família, em especial à minha irmã e avó que tornavam as idas à Figueira da Foz ainda mais reconfortantes.

Esta dissertação é acima de tudo dedicada à minha mãe, que sem dúvida foi a pessoa que mais me apoiou durante todo este processo. Durante a tese, durante o curso e acima de tudo durante a vida. Nos momentos de maior desmotivação e devaneios ela sempre me apoiou e sempre acreditou em mim. Aprendi muito com a sua compaixão e bondade. Tudo o que sou hoje devo em especial a ela e é com enorme felicidade que ouço dizê-la que tem orgulho em mim. Espero merecer a sua admiração pois sei que vai ser sempre incondicional.

Resumo

Actualmente há uma crescente evolução nas tecnologias de realidade aumentada, que proporcionam ao utilizador uma experiência acrescida do modo como este interage com o mundo. Dessas tecnologias uma das mais promissoras é a utilização dos *head-mounted display*. O objectivo dos *head-mounted display* é levar esta experiência de realidade aumentada a outro nível, ao colocar-se todas as potencialidades dos dispositivos actuais nuns “óculos”.

O presente trabalho de dissertação de Mestrado em Engenharia Física, teve como objectivo desenvolver um sistema *head-mounted display* binocular do tipo *see-through*, com a possibilidade de se alterar dinamicamente o plano focal da imagem. Este trabalho teve como ponto de partida um protótipo monocular *see-through* já existente na *Lusospace* que foi utilizado como base. As principais inovações face ao protótipo inicial focaram-se sobretudo na implementação de um sistema binocular e na possibilidade de alteração dinâmica do plano de focal das imagens.

O protótipo desenvolvido teve como principal objectivo o estudo de imagens estereoscópicas, em particular a disparidade entre a distância de convergência e a distância de acomodação das mesmas, sendo esta uma das principais causas para o desconforto das imagens estereoscópicas. Só com um dispositivo que permite a alteração do plano focal da imagem é possível igualar estas duas distâncias.

A fonte de imagem do protótipo desenvolvido são dois micro-ecrãs que são magnificados através de uma ocular. Para se conseguir ver o mundo exterior e virtual, condição necessária a um HMD *see-through*, foram usados dois espelhos com taxas de transmissão e reflexão 50/50 na gama do visível. Neste trabalho foi desenvolvida a electrónica necessária ao funcionamento dos micro-ecrãs e o desenho e construção do sistema opto-mecânico que permite alterar a distância entre os micro-ecrãs e as oculares para a alteração do plano focal da imagem. Adicionalmente foi desenvolvida uma interface em *LabVIEW* que permite o controlo de vários parâmetros dos ecrãs.

Nos testes realizados foi traçada a curva da zona de conforto entre a distância de convergência e a distância de acomodação das imagens estereoscópicas e foi realizado um estudo sobre o impacto na profundidade dos objectos virtuais quando sobrepostos em objectos reais.

Palavras Chave: *Head-mounted display*, Imagens estereoscópicas, Convergência, Acomodação visual, Percepção de profundidade

Abstract

Currently there has been a growing trend in augmented reality technologies that provide the user an enhanced experience in the way he interacts with the world. One of the most promising technologies is the head-mounted displays. The objective of the head-mounted display is to take this experience to another level by putting the full potential of current devices on a glasses.

The purpose of this master's dissertation in Engineering Physics is to develop a binocular see-through head-mounted display with the particularity of dynamically changes the focal plane. The starting point of this work was a monocular prototype existing in Lusospace. The innovation was mainly on the implementation of a binocular system, which dynamically changes the focal plane of the images.

The main objective of the prototype was the study of stereoscopic images, in particularly the disparity between the distances of convergence and accommodation, which is a major cause for the discomfort of stereoscopic images. Only with a device that allows the change of the focal plane it is possible to match these two distances.

The image sources of the developed prototype are two micro displays that are magnified by an eyepiece. To be able to see the real and the virtual world, a necessary condition of a see-through HMD, we used two mirrors with reflection and transmission rates of 50/50 in the visible range. In this work was developed the electronics for the operation of the microdisplays and the design and construction of optomechanical system which allow the amendment of the distance between the microdisplays and eye for changing the focal plane image.

In the tests performed it was drawn the comfort zone between the distance of accommodation and convergence of stereoscopic images and a study of the impact in depth of virtual images superimposed on real objects.

Keywords: *Head-mounted display*, Stereoscopic images, Convergence, Visual accommodation, Depth perception

Índice de Matérias

Copyright	iii
Agradecimentos	vii
Resumo.....	ix
Abstract	xi
Índice de Matérias.....	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos	xix
Simbologia	xxi
Capítulo 1 – Enquadramento	1
Capítulo 2 – Introdução.....	3
2.1 Fundamentos Ópticos.....	5
2.1.1 Campo visual.....	5
2.1.2 Distância à ocular.....	5
2.1.3 Pupila de saída.....	5
2.1.4 Equação para conjuntos de lentes espessas	6
2.1.5 Aberrações.....	8
2.2 Sistema visual humano	9
2.2.1 Fisiologia do olho humano.....	9
2.2.2 Resolução.....	10
2.2.3 Campo de visão.....	10
2.2.4 Características espectrais	11
2.2.5 Percepção de Profundidade	11
Capítulo 3 – Estado da Arte.....	15
3.1 Micro-ecrãs.....	15
3.2 Desenho óptico.....	16
3.3 Imagens estereoscópicas em HMD	18
3.3.1 Paralaxe no ecrã	19
3.3.2 Acomodação/Convergência.....	20
3.3.3 Percepção de profundidade entre objectos virtuais e reais.....	24
Capítulo 4 – Projecto e Concepção de um HMD	27

4.1	Electrónica	28
4.1.1	Ecrãs.....	28
4.1.2	Controladores.....	29
4.1.3	Módulo de expansão gráfica	31
4.1.4	Sinal de vídeo.....	32
4.1.5	Alimentação, transmissão e recepção de dados	34
4.1.6	Implementação.....	34
4.2	Interface.....	36
4.2.1	Protocolo de comunicação	37
4.2.2	Formato do pacote de dados.....	38
4.2.3	Interface <i>LabVIEW</i>	40
4.3	Desenho óptico.....	44
4.3.1	RKE 28 mm.....	44
4.3.2	Distância do plano focal.....	47
4.3.3	Simulações com Sistema Completo.....	51
4.4	Sistema mecânico	52
4.4.1	Projecto.....	52
4.4.2	Montagem geral	55
4.5	Custos do Projecto.....	58
Capítulo 5 –	Resultados e Discussão	61
5.1	Imagens 3D com plano focal fixo.....	61
5.2	Imagens 3D com alteração do plano focal	65
5.2.1	Zona de conforto entre a distância de convergência e a distância de acomodação 65	
5.2.2	Objectos virtuais sobrepostos em objectos reais.....	67
5.3	Discussão de resultados	69
Capítulo 6 –	Conclusões e Perspectivas Futuras	73
Bibliografia	77
Anexos	79
PIN-Out	79
Desenho Técnicos	81

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Princípio básico de um HMD [1].....	3
Figura 2.2 – Campo de visão de um HMD [1].....	5
Figura 2.3 – Esquema de uma lente simples.....	7
Figura 2.4 – Esquema do olho humano [7].	10
Figura 2.5 – Esquema para o cálculo da disparidade da retina.....	12
Figura 3.1 – Geometria paraxial de uma ocular.....	17
Figura 3.2 – Alguns dos principais exemplos de oculares usadas em HMD. Adaptadas de [17] [18].	17
Figura 3.3 – Paralaxe no ecrã. Adaptada de [6].	20
Figura 3.4 – Distâncias de convergência e acomodação para varias situações: À direita, as 2 colunas representam situações de visão natural (N) e situações de visão 3D estéreo. À esquerda encontra-se a representação gráfica da distância de acomodação em função da distância de convergência para as 4 situações apresentadas. Adaptada de [4].....	21
Figura 3.5 – Desenho óptico para um HMD com alteração do plano focal da imagem. Adaptada de [6].	23
Figura 3.6 – Zona de conforto entre a acomodação e convergência. Do lado esquerdo é apresentado o resultado em dioptrias e no lado direito em metros. Adaptada de [4].....	24
Figura 4.1 – Esquema do HMD monocular existente na <i>Lusospace</i>	27
Figura 4.2 – Fotografia do HMD monocular existente na <i>Lusospace</i>	28
Figura 4.3 – Micro-ecrãs SVGA+ <i>Color OLED</i> da <i>eMagin</i> [30].	28
Figura 4.4 – Controlador <i>O5 Zif</i> da <i>TekGear</i> . Da esquerda para a direita: vista inferior do controlador; vista superior do controlador; micro-ecrã SVGA+ <i>Color OLED</i> da <i>eMagin</i> conectado ao controlador [31].	30
Figura 4.5 – Esquema do controlador <i>O5</i> com destaque às 4 resistências de 0 Ohms removíveis [31].	31
Figura 4.6 - <i>Matrox DualHead2Go Digital Edition</i> [32].	32
Figura 4.7 – Esquema das várias etapas do sinal de vídeo.	33
Figura 4.8 – Esquema dos sinais de alimentação e dados.	34
Figura 4.9 – Esquema das ligações eléctricas dentro da caixa.....	35
Figura 4.10 – Fotografia das ligações eléctricas dentro da caixa.....	36
Figura 4.11 – Fotografia do cabo implementado.....	36
Figura 4.12 – Esquema do controlador <i>O5</i> da <i>TekGear</i> evidenciando a vermelho a resistência de 0 Ohms que permite definir se o controlador é “esquerdo” ou “direito” [34].....	37
Figura 4.13 - Comunicação <i>half duplex</i> [34].	38
Figura 4.14 – Fluxograma principal do <i>software</i>	41
Figura 4.15 – Fluxograma da rotina de inicialização.	42
Figura 4.16 – Interface <i>LabVIEW</i>	43
Figura 4.17 - Interface <i>LabVIEW</i> , menu de comunicação.	44
Figura 4.18 – Simulação em <i>Zemax</i> fornecida pelo fabricante.	45
Figura 4.19 – Configuração da ocular RKE 28mm da <i>Edmund Optics</i>	46

Figura 4.20 – Distância do plano focal da imagem em função da distância do micro-ecrã à ocular.....	47
Figura 4.21 – Estudo paraxial da montagem experimental	48
Figura 4.22 – Configuração da lente AC254-075-A1 da <i>ThorLabs</i>	48
Figura 4.23 – Configuração das lentes da montagem experimental.	49
Figura 4.24 – Distância do alvo em função da distância do micro-ecrã.....	49
Figura 4.25 – Dados obtidos experimentalmente e respectivo ajuste.	50
Figura 4.26 – Distância do plano focal, calculada a partir dos dados experimentais em função da distância do micro-ecrã e respectivo ajuste.....	51
Figura 4.27 – Simulação do sistema completo em <i>Zemax</i>	52
Figura 4.28 – Desenhos das perspectivas da caixa que comporta os micro-ecrãs.	53
Figura 4.29 - Desenhos das perspectivas da caixa que suporta as oculares e os espelhos.	53
Figura 4.30 – Desenho da face superior, evidenciando o sistema que permite a inclinação das oculares.	54
Figura 4.31 – Desenho da face posterior evidenciando o sistema que permite a inclinação dos espelhos.	54
Figura 4.32 - Desenho final do projecto com as duas caixas.	55
Figura 4.33 – Fotografia do sistema completo montado, evidenciando os vários elementos relacionados com a caixa dos ecrãs.	56
Figura 4.34 - Fotografia do sistema completo montado, evidenciando os vários elementos relacionados com o desenho óptico.	57
Figura 4.35 – Sistema completo com todas as ligações necessárias ao seu funcionamento.	57
Figura 5.1 – Vuzix- Wrap 920AR [35].....	61
Figura 5.2 – Disparidade das imagens do olho direito e do olho esquerdo em função da distância. À esquerda a disparidade apresenta-se em mm e à direita em <i>pixels</i>	62
Figura 5.3 – Imagens do olho esquerdo e direito respectivamente. O quadrado verde apresenta uma disparidade correspondente a um objecto a 4 m, o vermelho a 3 m e o azul a 2 m.....	62
Figura 5.4 – Sobreposição das imagens do olho esquerdo e direito (de notar que o fundo foi alterado para branco nesta figura para uma melhor percepção).....	63
Figura 5.5 – Exemplos gerados no <i>software Autodesk Maya</i>	64
Figura 5.6 – Primeiro fotograma do exemplo gerado: os quatro objectos giram em torno do eixo vertical.	65
Figura 5.7 – Resultados obtidos da primeira experiência.	66
Figura 5.8 – Resultados obtidos para a zona de conforto, e curva de ajuste aos pontos.....	67
Figura 5.9 – Resultados obtidos na segunda experiência.	69

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Comparação da luminosidade e contraste das várias tecnologias de ecrãs usadas nos HMD [15].	16
Tabela 4.1 – Características gerais dos micro-ecrãs SVGA+ <i>Color</i> OLED da <i>eMagin</i> [30].	29
Tabela 4.2 – Parâmetros ajustáveis através das resistências [31].	31
Tabela 4.3 – Tabela da gama de valores possíveis no <i>byte</i> de dados para cada parâmetro e sua descrição.	39
Tabela 4.4 – Raios, distâncias e índices de refacção das várias superfícies do conjunto óptico	45
Tabela 4.5 - Raios, distâncias e índices de refacção das várias superfícies da lente AC254-075-A1 da <i>ThorLabs</i>	48
Tabela 4.6 – Custos do Projecto.	58
Tabela 5.1 – Resultados obtidos na segunda experiência	69

Lista de Acrónimos

HMD	<i>Head-Mounted Display</i>
3D	Três dimensões
2D	Duas dimensões
CRT	<i>Cathode ray tube</i>
LCD	<i>Liquid crystal display</i>
LCoS	<i>Liquid crystal on silicon</i>
TMOS	<i>Time multiplexed optical shutter</i>
AM-LCD	<i>Active-matrix liquid crystal display</i>
CMOS	<i>Complementary metal–oxide–semiconductor</i>
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
SVGA	<i>Super Video Graphics Array</i>
WUXGA	<i>Widescreen Ultra Extended Graphics Array</i>
RSD	<i>Retinal scan display</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical system</i>
HOE	<i>Holographic optical element</i>
DVI	<i>Digital Visual Interface</i>
VSIS	<i>Video Signal Standard</i>
VESA	<i>Video Electronics Standards Association</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>
DC	<i>Direct current</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado
PAL	<i>Phase Alternating Line</i>
NTSC	<i>National Television System Committee</i>

Simbologia

P_f	Ponto de fixação
δ_E	Disparidade na retina do olho esquerdo
δ_D	Disparidade na retina do olho direito
P_L	Ponte mais longe em relação ao ponto de fixação
P_P	Ponte mais perto em relação ao ponto de fixação
PE	Paralaxe no ecrã
DIP	Distância interpupilar
d_{3D}	Distância do objecto 3D
d_{PF}	Distância do plano focal
FOV	Campo de visão
S	Tamanho do ecrã
F	Distância focal da lente (objecto)
F'	Distância focal da lente (imagem)
D_L	Diâmetro da lente
L_e	Distância à ocular
O	Distância do objecto à lente
I	Distância da imagem à lente
\mathcal{A}	Matriz do sistema
\mathcal{R}_m	Matriz de refração da superfície m
R_m	Raio da superfície m
$\mathcal{T}_{m(m-1)}$	Matrizes transferência entre a superfície m e $m - 1$
n_{im}	Índice de refração do material antes da superfície m
n_{tm}	Índice de refração do material depois da superfície m
EFL	Distância focal efectiva
h_o	Distância do plano principal do objecto ao primeiro vértice
h_i	Distância do plano principal da imagem ao último vértice
a_{lc}	Elemento da matriz do sistema, \mathcal{A} , na linha l e coluna c
$d.f.a.$	Distância focal anterior
$d.f.p.$	Distância focal posterior
$d.o.$	Distância à ocular
d_{me}	Distância do micro-ecrã à ocular

d_{pf}	Distância do plano focal da imagem
d_{alvo}	Distância do alvo à lente

Capítulo 1 – Enquadramento

Esta dissertação enquadra-se no projecto OVAN (Óculos de Visão Aumentada com Sistema de Navegação para o mercado de massas) da *Lusospace*, onde se desenvolveu um protótipo binocular *see-through* que permite a alteração do plano focal da imagem.

Foi ainda possível a partir do sistema construído, avaliar o efeito da exibição de imagens estereoscópicas neste tipo de dispositivos e estudar a zona de conforto entre a acomodação e convergência e o impacto na percepção de profundidade dos objectos virtuais quando sobrepostos em objectos reais.

O projecto desenvolvido é apenas um protótipo para fins de investigação preliminares onde se adquiriu conhecimento e experiência para realizar futuramente um dispositivo comercial que concorra fortemente com dispositivos semelhantes já disponíveis no mercado. No projecto onde este trabalho se insere, poderão ainda ser incorporados e testados outros projectos realizados na *Lusospace* no mesmo âmbito.

Capítulo 2 – Introdução

Actualmente há uma crescente evolução nas tecnologias de *smartphones* e *tablets*, que proporcionam ao utilizador uma experiência aumentada do modo como interagimos com o mundo, permitindo comunicar com pessoas e obter informação e conteúdos de uma forma instantânea. O objectivo dos HMD é levar esta experiência a outro nível ao colocarmos todas as potencialidades dos dispositivos actuais nuns “óculos”, permitindo ainda todo um novo conjunto de possibilidades.

Um HMD é composto por uma fonte de luz modulada visualizada através de um sistema óptico que é usado na cabeça do utilizador através de uma banda, capacete, ou em torno de uma armação de óculos (Figura 2.1). A complexidade do sistema pode ainda ser aumentada com a adição de sensores para o rastreamento do movimento do utilizador e dos seus olhos, câmaras de filmar, som e interface dispositivo/utilizador. O utilizador tem de ser o ponto central quando se concebe um HMD, sendo o estudo das características visuais e motoras do ser humano e o meio ambiente onde este está inserido essencial para o sucesso na concepção de um HMD [1].

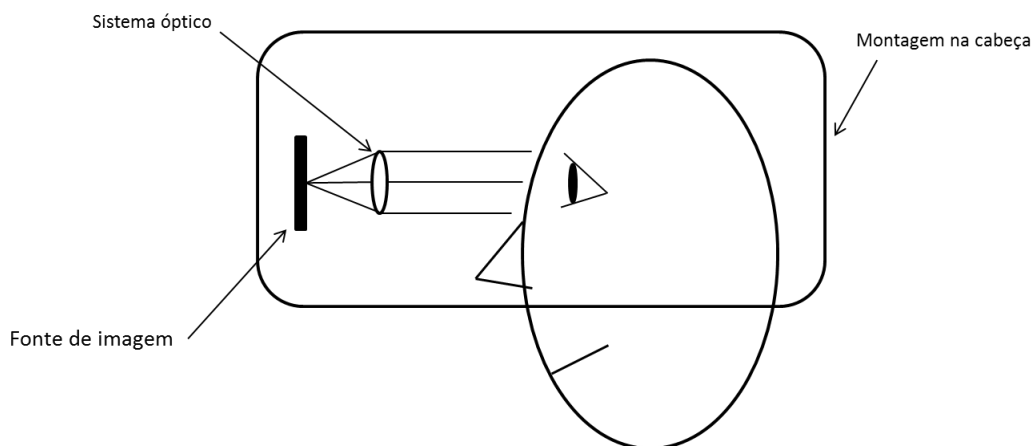


Figura 2.1 – Princípio básico de um HMD [1].

Um HMD pode ter inúmeras aplicações: militares, onde os HMD são integrados nos capacetes dos soldados, podendo estes obter informações complementares e visão nocturna; na engenharia e ciência com a projecção de desenhos assistidos por computador (CAD) estereoscópios e na manutenção de sistemas complexos através da projecção de informações sobre ligações eléctricas, temperaturas, etc.; na medicina, proporcionando ao médico durante uma cirurgia informações sobre o estado do doente e visão Raio-X; e no entretenimento, em vídeo jogos, filmes e realidade aumentada.

Os HMDs têm sido classificados por imersivos ou *see-through*. Os HMD imersivos são sistemas em que a óptica é posicionada à frente dos olhos, bloqueando a maior parte do campo visual. Este desenho é bastante usado para aplicações de realidade virtual, onde o utilizador está completamente submerso no mundo virtual como por exemplo em jogos de computador. No sistema *see-through* para além de se visualizar o conteúdo virtual, é possível ver também o mundo exterior, podendo-se, deste modo, sobrepor as imagens virtuais no mundo real. Esta é a solução ideal para aplicações de realidade aumentada. Existe um terceiro tipo chamado de *video see-through* onde duas câmaras capturam a cena exterior combinando-as com as imagens virtuais; o campo de visão do utilizador está completamente bloqueado, e o mundo exterior é visto através dos ecrãs [2].

Um HMD pode apresentar três variantes: monocular, biocular ou binocular. Um sistema monocular apresenta apenas um canal de vídeo para um dos olhos. É o mais leve, barato e simples das três abordagens supra mencionadas. O sistema biocular apresenta um só canal de vídeo visualizado pelos dois olhos; e o sistema binocular apresenta duas fontes de vídeo independentes, uma para cada olho. É o mais pesado, caro e complexo dos três sistemas, mas apresenta um série de vantagens como a capacidade da sobreposição binocular (aumentando o campo de visão), a possibilidade de exibir imagens estereoscópicas e uma maior liberdade e flexibilidade no desenho do equipamento [1].

Estereoscopia é uma técnica usada para se obter informações do espaço tridimensional, através da análise de duas imagens obtidas em pontos diferentes. Devido à separação horizontal dos olhos (distância interpupilar) são projectadas duas imagens ligeiramente diferentes para cada olho, o cérebro funde as duas imagens no córtex visual e, nesse processo, o indivíduo obtém informações quanto à profundidade, distância, posição e tamanho dos objectos, gerando uma sensação de visão tridimensional. Os HMD binoculares são especialmente bons para a exibição de imagens estereoscópicas porque cada olho tem um sistema independente de visualização, permitindo colocar diferentes imagens para cada olho, condição necessária para a exibição de imagens estereoscópicas.

Com o desenvolvimento das imagens estereoscópicas e tecnologias associadas, desencadeou-se uma crescente preocupação com as consequências que estas imagens podem causar ao utilizador. Um dos maiores causadores de desconforto, e que é abordado com especial ênfase nesta dissertação, é o conflito entre a convergência e a acomodação [3][4][5].

2.1 Fundamentos Ópticos

Neste capítulo abordam-se os conceitos ópticos principais e necessários para a concepção de um HMD. Nas características que estão directamente relacionadas com o olho humano incluem-se o campo de visão do sistema óptico do HMD, a distância à ocular e a pupila de saída. No capítulo 2.1.4 faz-se uma abordagem ao sistema matricial, usado para a caracterização de conjuntos ópticos com várias lentes e no capítulo 2.1.5 uma pequena revisão das aberrações ópticas.

2.1.1 Campo visual

Simplificando, o campo de visão de um HMD é ângulo que subentende a imagem virtual do HMD vista pelo observador, tipicamente medido em graus (Figura 2.2). O campo de visão óptico pode ser calculado usando a Eq. 2.1.

$$FOV = 2 \arctan\left(\frac{S}{2F}\right) \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde FOV é o campo de visão, S o tamanho da imagem e F a distância ao plano focal.

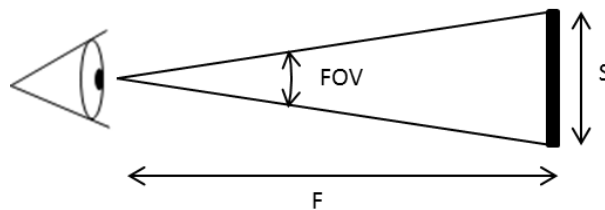


Figura 2.2 – Campo de visão de um HMD [1].

Como os ecrãs são geralmente rectangulares é fundamental referir se o campo de visão é horizontal, vertical ou diagonal. O campo visual mais frequente na concepção de um HMD é de aproximadamente 30° [1].

2.1.2 Distância à ocular

A distância à ocular é simplesmente a distância do olho ao elemento óptico mais próximo deste ou da estrutura de suporte. De modo a permitir o uso de óculos esta distância terá de ser entre os 20 e os 25 mm [1].

2.1.3 Pupila de saída

A pupila de saída é um volume no espaço, geralmente cónico, onde o observador consegue ver todo o campo de visão do ecrã. Se o olho do observador estiver fora deste

volume parte do campo de visão estará cortado. Uma grande pupila de saída permitirá o movimento do olho sem que apareça o ecrã cortado. O diâmetro da íris varia entre os 2 mm quando está exposta ao sol e os 7 mm na escuridão; é assim conveniente que a pupila de saída do sistema óptico tenha pelo menos 7 mm de diâmetro, contudo uma maior pupila de saída permitirá o movimento dos olhos e uma folga para o encaixe do HMD na cabeça [1].

2.1.4 Equação para conjuntos de lentes espessas

Considerando que a lente não tem espessura, a equação que relaciona a distância do objecto O , com a distância da imagem I e a distância focal da lente F é chamada de equação das lentes delgadas.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{I} + \frac{1}{O} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Este método é bastante simples e pode ser usado como primeira abordagem quando se estuda um sistema óptico. Contudo, para uma melhor caracterização das lentes outros métodos terão de ser usados visto que as lentes têm espessura. Para tal, um método bastante simples e eficaz que pode ser usado para sistemas complexos de múltiplas lentes espessas é o método matricial.

O método matricial representa o sistema óptico através de uma matriz chamada de matriz do sistema, \mathcal{A} , que é o produto de todas as matrizes transferência \mathcal{T} e das matrizes de refração \mathcal{R} . Num sistema de m superfícies as varias matrizes são dadas por:

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \mathcal{R}_m \mathcal{T}_{m(m-1)} \mathcal{R}_{(m-1)} \dots \mathcal{R}_2 \mathcal{T}_{21} \mathcal{R}_1 \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$\mathcal{R}_m = \begin{bmatrix} 1 & -D_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$D_m = \frac{(n_{tm} - n_{im})}{R_m} \quad \text{Eq. 2.5}$$

$$\mathcal{T}_{m(m-1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d_{m(m-1)}/n_{i(m-1)} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Sendo R_m o raio da superfície m , n_{im} é o índice de refração do material antes da superfície m e n_{tm} o índice de refração do material depois da superfície m . A partir dos elementos da matriz do sistema poderemos localizar os pontos principais e a distância focal efectiva do sistema de lentes. As distâncias dos planos principais do objecto e da imagem

aos vértices da primeira e última superfície, h_o e h_i , respectivamente, e a distância focal efectiva, EFL , vão ser dadas por:

$$h_o = \frac{n_{i1} \times (1 - a_{11})}{-a_{12}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$h_i = \frac{n_{t2} \times (a_{22} - 1)}{-a_{12}} \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$EFL = -\frac{1}{a_{12}} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde a_{lc} corresponde ao elemento da matriz do sistema \mathcal{A} , na linha l e coluna c .

Estes pontos e distâncias estão esquematizados na Figura 2.3 onde é apresentado um exemplo com uma lente simples. A distância focal efectiva, EFL , é medida a partir dos pontos principais. A distância focal anterior, $d.f.a.$, e distância focal posterior, $d.f.p.$ são calculadas a partir dos vértices sendo dadas por:

$$d.f.a. = EFL - h_o \quad \text{Eq. 2.10}$$

$$d.f.p. = EFL - h_i \quad \text{Eq. 2.11}$$

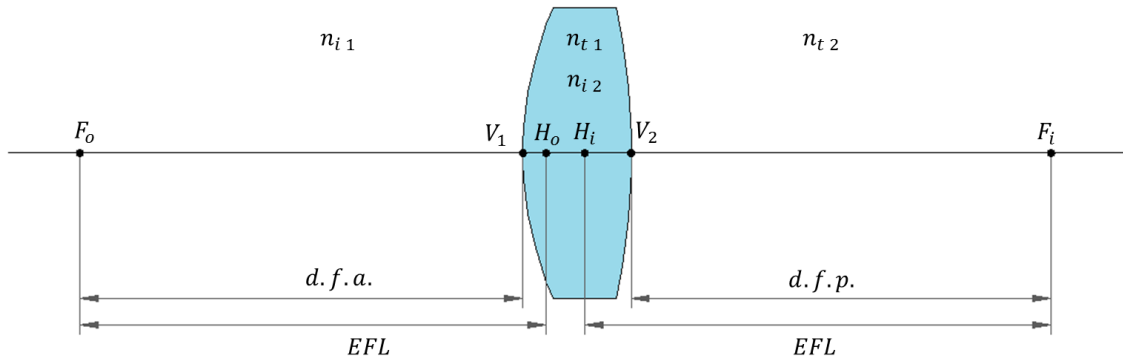


Figura 2.3 – Esquema de uma lente simples.

É nos pontos principais do objecto e da imagem que o plano principal intersecta o eixo óptico. O plano principal é uma superfície aproximadamente plana na região paraxial. Os pontos principais constituem óptimos pontos de referência a partir dos quais se devem medir os vários parâmetros do sistema. Apesar deste método ser bastante simples e eficaz não inclui os efeitos das varias aberrações, não constituindo um método perfeito mas sim aproximado [13].

2.1.5 Aberrações

As aberrações são também importantes na concepção do sistema óptico de um HMD. Numa primeira aproximação e neste projecto não vão ser muito estudadas, mas para futuro aperfeiçoamento do sistema óptico desenvolvido são melhorias essenciais, por isso faz-se aqui uma breve descrição das mesmas.

- **Aberração esférica:** é um fenómeno da óptica geométrica em que os raios de luz incidentes próximos da borda das lentes são muito mais refractados do que os raios que incidem próximos do centro das lentes. Em vez de se refractar no ponto focal os raios refractam-se à frente ou atrás dele, formando ao redor do ponto focal um halo luminoso concêntrico que deteriora a qualidade da imagem.
- **Coma:** Aberração inerente a certos modelos ópticos devido a imperfeições na lente ou outros componentes, que resulta em fontes de pontos fora do eixo assemelhando-se com um cometa no espaço.
- **Astigmatismo:** A imagem em dois planos ortogonais é focada a diferentes distâncias.
- **Curvatura de campo:** descreve a aberração óptica em que um objecto plano, perpendicular ao eixo óptico não pode ser focada numa imagem plana, em vez disso forma-se numa superfície curva chamada de superfície de *Petzval*.
- **Distorção:** Se for projectada uma grade quadrangular no sistema óptico devido à distorção provocada por este, será visualizada a mesma grade mas as suas arestas em vez de serem rectas (como no original) serão curvas, transformando a grade original numa figura semelhante a um barril (distorção convexa) ou a uma almofada (distorção côncava).
- **Aberração cromática** - dispersão produzida pelas lentes que possuem diferentes índices de refacção para diversos comprimentos de onda luminosa. Os pontos focais vão ser assim diferentes para cada comprimento de onda [13].

2.2 Sistema visual humano

O sistema visual humano é a principal interface num HMD e por isso, de modo a fornecer uma boa qualidade de imagem ao utilizador, têm de se ter em conta as suas características quando se pretende desenvolver um HMD. Neste capítulo faz-se um resumo das características principais a considerar para a concepção de um HMD: tamanho da pupila, acomodação, resolução, campo de visão, características espectrais, distância interpupilar e percepção de profundidade.

2.2.1 Fisiologia do olho humano

O olho humano é um complexo sistema óptico, assemelhando-se numa primeira abordagem a uma câmara, mas construído de modo diferente (Figura 2.4). Tem um diâmetro de cerca de 25 mm e está preenchido com dois fluidos diferentes (ambos com índice de refração de aproximadamente 1,336).

A íris é a abertura óptica do olho humano que regula a quantidade de luz incidente através da expansão ou contracção da mesma. O diâmetro da íris varia entre os 2 mm quando está exposta ao sol e os 8 mm na escuridão. O olho humano consegue adaptar-se a uma gama de luminosidade de cerca 9 ordens de magnitude, começando em aproximadamente 1/1.000 lux (corresponde a luz das estrelas) até aproximadamente 100.000 lux (corresponde a luz do Sol).

A córnea (índice de refração $\approx 1,4$) serve para a protecção do olho. O cristalino (índice de refração $\approx 1,4$) é responsável pela orientação da passagem de luz até à retina, sendo este o sensor de luz que se encontra na parte posterior do olho. O cristalino é uma lente elástica biconvexa que pode ajustar a sua forma para se obter distância focais diferentes, ficando espesso para objectos próximos e delgado para objectos longínquos. Este processo denomina-se de acomodação visual podendo variar a distância focal entre os 100 mm e o infinito, correspondendo a uma alteração no poder óptico de 10 dioptrias (a acomodação ao perto é degradada ao longo da idade). A imagem na retina é invertida como em qualquer lente biconvexa. A retina é constituída por milhões de células sensíveis à luz chamadas de foto-receptores. A área da retina com maior resolução é chamada de fóvea por conter uma maior densidade de foto-receptores. Na zona da periferia a imagem aparece distorcida [6].

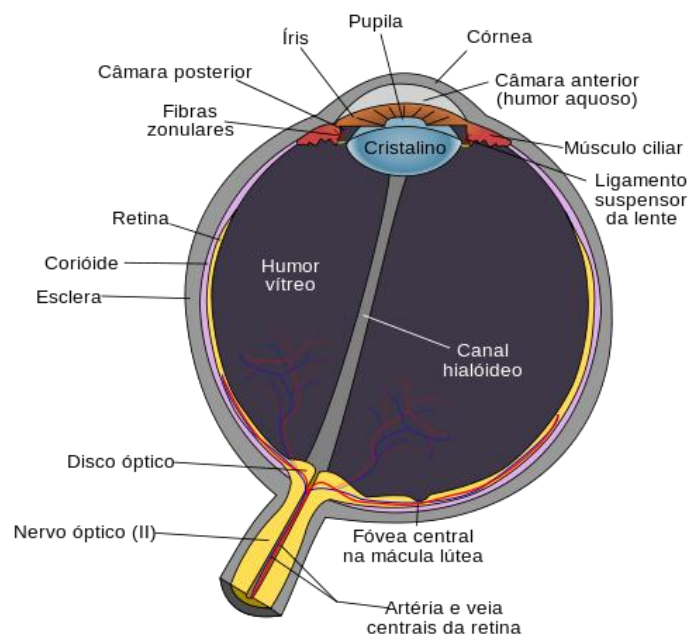


Figura 2.4 – Esquema do olho humano [7].

A distância interpupilar é a distância que separa os dois olhos. De acordo com a literatura varia entre os 50 - 70 mm sendo a média de 63 mm. De modo a incluir casos extremos e crianças é recomendado uma gama entre os 40 e 80 mm [8].

2.2.2 Resolução

A resolução do olho humano, também chamada de acuidade visual, é a capacidade do olho de reconhecer dois pontos muito próximos. Considera-se que o olho humano em condições de boa luminosidade apresenta uma resolução de $1'$ ($290,89 \mu\text{rad}$) na zona da fóvea, fora desta zona a resolução do olho diminui consideravelmente [9].

2.2.3 Campo de visão

O campo visual monocular abrange aproximadamente 200° horizontalmente e 130° verticalmente. A parte no campo visual que é partilhada pelos dois olhos simultaneamente é chamada de campo binocular e abrange 120° horizontalmente e 130° verticalmente [10]. A pequena porção do campo binocular onde ambos os olhos estão focados designa-se campo foveal e abrange 60° horizontalmente e verticalmente [6].

2.2.4 Características espectrais

De acordo com a *Commission International de L'Eclairage* (CIE), considera-se que o espectro visível está compreendido entre os 400 e os 700 nm. O pico de maior intensidade e onde o olho humano é mais sensível é nos 550 nm que corresponde à cor verde [11].

2.2.5 Percepção de Profundidade

A percepção tridimensional do nosso meio ambiente é essencial para a nossa orientação. Numa situação real existem várias “pistas” na imagem que enviam ao cérebro informação 3D sobre a cena. Estas pistas são chamadas de *visual depth cues*. As pistas de profundidade podem ser divididas em 4 tipos: monoscópicas (plana), estereoscópicas (relevo), fisiológicas e movimento [6].

Pistas para imagem plana (monoscópicas)

Conjunto de pistas obtidas através de uma imagem 2D única. Podemos incluir neste conjunto 6 pistas visuais: a oclusão, iluminação e sombras, tamanho do objecto, perspectiva linear, gradiente da textura da superfície e efeitos atmosféricos.

Pistas para imagem com relevo (estereoscópicas)

Quando se observa um objecto o olho esquerdo e direito apresentam perspectivas ligeiramente diferentes devido à separação horizontal dos olhos, distância interpupilar. Como resultado, as imagens sobre a retina de cada olho não serão iguais. Este deslocamento horizontal das imagens nas duas retinas designa-se de disparidade da retina. O sistema visual no córtex cerebral tem campos receptivos sensíveis à disparidade da retina obtendo-se assim sensação de profundidade; contudo o sistema visual humano não identifica a profundidade absoluta como um sensor de alcance, em vez disso compara as disparidades da retina dos vários objectos no campo visual para obter a profundidade relativa entre os objectos. Na Figura 2.5, esquematiza-se este conceito: os olhos rodam e convergem no ponto de fixação P_f ; δ_E e δ_D são os ângulos das linhas de convergência do novo objecto (mais próximo ou mais distante) em relação as linhas de convergência do ponto de fixação. A disparidade da retina em graus resulta na soma destes dois ângulos. Se o objecto se encontra mais distante que o ponto de fixação, P_L , a disparidade da retina será positiva, se o objecto se encontrar mais próximo que o ponto de fixação, P_P , a disparidade da retina será negativa.

A superfície onde a disparidade da retina é igual a zero é chamada de horóptero. Os pontos no espaço que definem esta superfície têm imagens em pontos correspondentes nas duas retinas, originando assim a percepção que se encontram todos à mesma distância. A

pequena região à volta de horóptero onde a fusão das imagens dos dois olhos acontece é chamada de área de fusão de *Panum*. Nesta área, o cérebro funde as duas imagens das retinas numa única imagem estereoscópica [12].

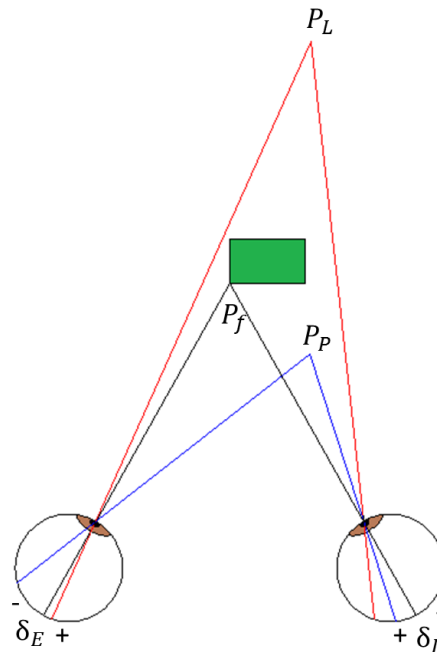


Figura 2.5 – Esquema para o cálculo da disparidade da retina.

Pistas Fisiológicas

Conjunto de pistas obtidas através da fisiologia e adaptação do olho humano à cena visualizada. Inclui-se neste tipo a convergência e acomodação dos olhos.

A convergência é a rotação dos olhos no eixo vertical quando estes se direccionam para um objecto distante para que a imagem seja projectada no centro da retina dos dois olhos. O estado dos músculos responsáveis pela convergência dá-nos informação sobre a distância até 10 m.

A acomodação consiste na mudança da forma do cristalino, alterando a potência da lente e consequentemente o plano focal; este é outro meio de perceber a distância das imagens e funciona sobretudo para distâncias próximas. Considera-se que a partir de aproximadamente 4 m esta informação é igual a imagens no infinito. O esbatimento dos objectos que estão próximos ou distantes é também uma forte fonte de informação de profundidade.

Pistas relacionadas com as dinâmicas do movimento

Outro importante indicador da profundidade é a mudança de perspectiva quando movemos a cabeça. Até o mais pequeno movimento resulta na mudança de pequenos detalhes na imagem entre os objectos a distâncias diferentes causando a percepção de profundidade. Mudanças de perspectiva em quase todas as direcções transmitem fortes informações sobre a profundidade.

Outro factor importante no movimento consiste na maior rapidez do movimento dos objectos mais próximos em relação aos objectos mais longínquos.

Capítulo 3 – Estado da Arte

3.1 Micro-ecrãs

A fonte de luz modulada de um HMD têm de ser fornecida através de um dispositivo pequeno, leve e de baixo consumo eléctrico. Para preencher estes requisitos, tem havido recentemente uma crescente evolução nos chamados micro-ecrãs (*microdisplays*) [14].

A luminosidade requerida para aplicações de realidade aumentada é bastante mais elevada quando comparada com os ecrãs convencionais, devido à interacção das imagens com o mundo exterior. Numa cena ao ar livre a luminosidade média é de cerca de 7.000 cd/m² podendo atingir os 40.000 cd/m².

Os primeiros modelos de HMD continham ecrãs de raios catódicos (CRT) monocromáticos em miniatura. Actualmente as principais escolhas são ecrãs de cristais líquidos (LCD), díodos de emissão de luz orgânicos (OLED), cristais líquidos sobre silício (LCoS) e obturador óptico de tempo multiplexado (TMOS).

Os ecrãs de cristais líquidos de matriz activa ou sobre silício (AM-LCD ou LCoS) podem ser transmissivos ou reflexivos exigindo óptica de iluminação. O aumento da luminosidade do ecrã aumenta também o seu tamanho relativamente aos ecrãs OLED. Sistemas de iluminação compactos LCoS com maior luminosidade estão actualmente em desenvolvimento para resolver este problema [11][15].

Os OLEDs são auto-emissivos, não necessitando assim de iluminação suplementar. São também interessantes no que concerne ao desenho dos polímeros possibilita a construção de ecrãs convexos ou côncavos. Sendo a grande vantagem dos OLEDs é o seu tamanho reduzido. Contudo sofrem não só de uma vida mais curta, mas também da degradação não uniforme de luminância para as várias cores.

OLEDs construídos em CMOS permitem também a deposição de estruturas nanométricas directamente nas placas de circuito integrado. Estas estruturas podem conter circuitos complexos como estruturas sensíveis à luz, permitindo por exemplo rastreamentos da retina integrados na estrutura do ecrã. Os ecrãs OLED oferecem uma grande melhoria na nitidez e contraste quando comparados com os LCD [16].

Ecrãs TMOS estão ainda em desenvolvimento e são bastante promissores no que toca aos custos de produção e eficiência do consumo [6].

Na Tabela 3.1 encontra-se a comparação das várias tecnologias referidas.

Tabela 3.1 – Comparação da luminosidade e contraste das várias tecnologias de ecrãs usadas nos HMD [15].

	CRT	LCD	LCoS	OLED	TMOS
Tamanho diagonal (mm)	> 12,7	> 17,8	> 15,2	> 15,3	> 12,7
Duração de vida (1000 horas)	40	20 - 40	10 - 15	< 10	> 100
Luminosidade (cd/m²)	~ 100	< 100	300 - 1.000	100 - 700	200 - 1.000
Contraste	300:1 – 700:1	150:1 – 450:1	> 2.000:1	150:1 – 450:1	300:1 – 4.500:1

As resoluções dos micro-ecrãs mais utilizadas em HMD são de 640x480 (VGA) e 800x600 (SVGA) que correspondem a um formato 4:3. Actualmente já estão disponíveis micro-ecrãs com formato panorâmico 16:9 e resoluções até aos 1.920x1.200 (WUXGA).

3.2 Desenho óptico

É possível categorizar o desenho óptico de um HMD em dois tipos:

- *pupil forming* - onde estão incluídos sistemas idênticos a microscópios compostos, sistemas de projecção óptica e ecrãs de varredura da retina, RSD.
- *non-pupil forming* - como numa simples lupa ou ocular.

Uma ocular consiste simplesmente numa lente positiva, que pode ser composta por vários elementos para corrigir aberrações e melhorar a qualidade da imagem, que forma uma imagem virtual quando o objecto se encontra a uma distância menor que a distância focal da lente (Figura 3.1). A imagem virtual gerada pela ocular tem a mesma orientação do objecto. Este sistema tem a vantagem de ser simples, leve, pequeno e barato. É igualmente “generoso” em relação à posição do olho no sistema óptico.

Na Figura 3.1 encontra-se o traçado de raios paraxial de uma ocular ou lupa. Onde F e F' são os pontos focais do conjunto de lentes. Colocando o objecto, O , entre a lente e a sua distância focal é gerada uma imagem virtual, I . O olho é a pupila de saída do conjunto óptico. A distância do olho ao primeiro elemento óptico é a distância à ocular, $d.o.$.

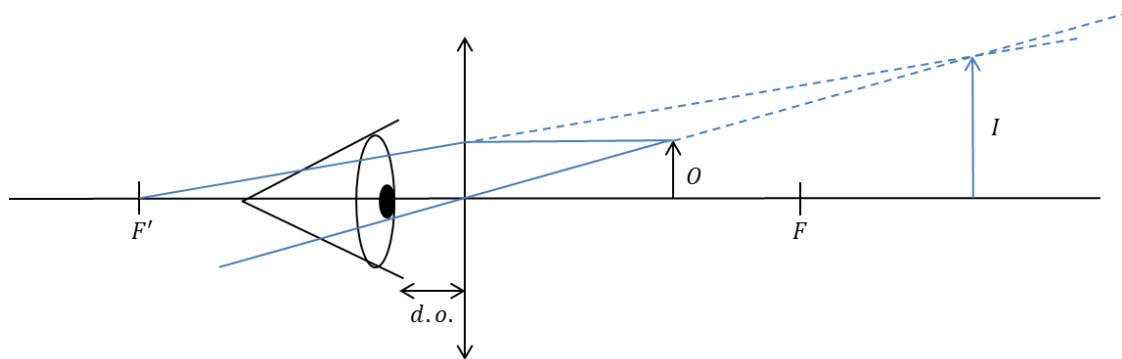


Figura 3.1 – Geometria paraxial de uma ocular.

Vários desenhos de oculares estão actualmente disponíveis, na Figura 3.2 encontram alguns dos principais exemplos de oculares usados em HMD, apresentando também a distância focal efectiva e campo de visão correspondentes.

	<p>Ramsden</p> <p>FOV – 30° EFL – 48,3 mm</p>
	<p>Kellner</p> <p>FOV – 36° EFL – 39,9 mm</p>
	<p>Erfle</p> <p>FOV – 60° EFL – 24,1 mm</p>
	<p>J. D. Robinson C. M. Schor P. H. Muller W. A. Yankee</p> <p>FOV – 33° EFL – 34 mm</p>

Figura 3.2 – Alguns dos principais exemplos de oculares usadas em HMD. Adaptadas de [17] [18].

Projectores ópticos apoiados na cabeça são uma solução alternativa para o desenho óptico de um HMD. A ideia básica é colocar uma imagem real em frente ao utilizador. Tem a vantagem de permitir que múltiplos utilizadores interajam com o ambiente virtual [11].

Ecrãs de varredura da retina (RSD) pretendem mover um feixe de luz directamente sobre a retina do utilizador. Este tipo de dispositivos apresentam bastantes vantagens em relação aos sistemas convencionais, entre elas: um grande campo de visão, alta resolução, brilho e contraste superiores. A grande dificuldade é a necessidade de dispositivos mecânicos para fazer a varredura da retina *pixel a pixel* a uma frequência que possa competir com os sistemas convencionais. Actualmente com o desenvolvimento dos sistemas electromecânicos micrométricos, MEMS (*MicroElectroMechanical System*) tem sido possível frequências que suportam resoluções de 1.280x1.024 [19].

Outra tecnologia também em expansão que poderá ser usada na concepção do desenho óptico de um HMD são os elementos ópticos holográficos, HOE, que permitem grandes campos de visão e sistemas ópticos bastante reduzidos a nível de tamanho [20].

3.3 Imagens estereoscópicas em HMD

A percepção tridimensional do meio ambiente é essencial para a nossa orientação. Reproduzir a mesma impressão de tridimensionalidade num ecrã 2D é difícil. A perspectiva de uma câmara só é igual à real se o objecto virtual produzir a mesma imagem na retina que o objecto real; para tal têm de se reproduzir no ecrã as mesmas linhas de percepção convergentes como na situação real.

Os HMD são especialmente bons a exibir imagens estereoscópicas porque contêm dois ecrãs em separado. Permitem assim exibir uma imagem para o olho esquerdo e outra para o olho direito, condição necessária para a exibição de imagens estereoscópicas binoculares. Contudo HMDs apresentam características diferentes dos ecrãs convencionais; uma delas é que as imagens vistas através de um HMD são imagens virtuais geradas pelo sistema óptico posicionado à frente dos olhos. A localização das imagens depende do conjunto óptico usado e está relacionada com a acomodação dos olhos. Outra característica dos HMD é que contêm dois sistemas ópticos independentes, um para cada olho, sendo necessário ajustar a distância e o ângulo entre eles. O ângulo de convergência de HMD, i.e., o ângulo entre os dois sistemas ópticos monoscópicos afecta o ponto de fixação dos olhos [21].

De notar que o sistema visual humano difere de pessoa para pessoa, o que determina directamente a sua aptidão para percepção de imagens estereoscópicas. Estima-se que cerca de 5% a 10% da população sofre de cegueira estereoscópica, não conseguindo fundir as imagens estereoscópicas [22].

3.3.1 Paralaxe no ecrã

Embora a estereopsia biológica seja geralmente discutida em termos da disparidade lateral da retina (capítulo 2.2.5), quando se discute projecções estereoscópicas artificiais é conveniente introduzir uma variável denominada paralaxe. Tal como a disparidade a paralaxe é um deslocamento horizontal entre as imagens esquerda e direita; a diferença é que enquanto a disparidade é medida na retina e relativamente a objectos com diferentes profundidades, a paralaxe é medida em algum plano arbitrário entre os olhos e o objecto, neste caso o ecrã. A paralaxe no ecrã, i.e., a disparidade entre as duas imagens projectadas no ecrã, é dada pela Eq. 3.1.

$$PE = \frac{DIP (d_{3D} - d_{PF})}{d_{3D}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde DIP é a distância interpupilar, d_{3D} a distância do objecto 3D aos olhos e d_{PF} a distância do plano focal aos olhos (distância do ecrã).

Tal como na disparidade da retina um valor negativo resulta na percepção que o objecto está mais próximo que o ecrã e um valor positivo resulta na percepção que o objecto está mais distante que o ecrã (Figura 3.3). Este efeito é bastante impressionante mas o seu uso em excesso poderá resultar em alguns efeitos indesejados: objectos cortados, quando não se visualiza o objecto completo nos dois olhos; diplopia, caso em que o cérebro já não funde a imagem causando o aparecimento de dois objectos; desconforto e fadiga do utilizador. A única medida de segurança aconselhada é usar este efeito com cuidado e de acordo com as características do equipamento utilizado[6].

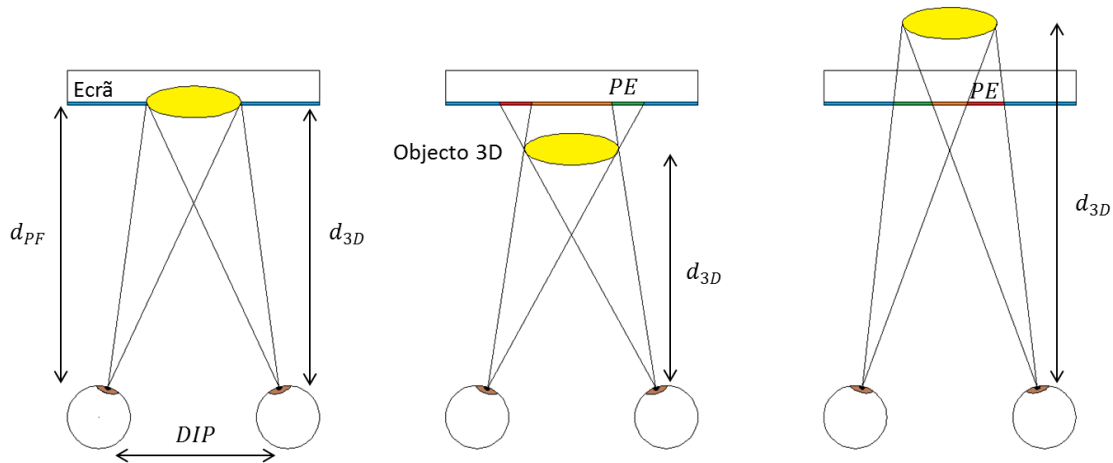


Figura 3.3 – Paralaxe no ecrã. Adaptada de [6].

3.3.2 Acomodação/Convergência

Com o desenvolvimento das imagens estereoscópicas e tecnologias associadas tem havido uma crescente preocupação com as consequências que estas imagens podem causar ao utilizador. Existem inúmeras causas potenciais para o desconforto do utilizador ao ver imagens estereoscópicas: imagens fantasmas, desalinhamento entre as duas imagens, orientação inapropriada da cabeça, entre outras. Um dos principais factores causador de desconforto, e que é analisado com especial atenção nesta dissertação, é o conflito entre a convergência e a acomodação. Em condições normais de visualização os planos de convergência e de acomodação praticamente coincidem, contudo, ao visualizar imagens estereoscópicas as linhas de convergência cruzam-se num ponto diferente do plano de ecrã. Assim, a informação sobre a distância do objecto dada pela acomodação do olho é diferente da informação dada pela convergência dos olhos. Estas condições provocam uma grande sobrecarga ao olho e tem sido apontada como a principal causa de desconforto e fadiga na visualização de imagens estereoscópicas [23][5][3][4].

Na Figura 3.4 esquematiza-se a diferença entre a visão natural e a visão 3D através de imagens estereoscópicas. A primeira coluna ilustra a visão natural (N1 e N2) onde a distância de convergência é igual à distância de acomodação. Graficamente os pontos encontram-se na linha a preto do gráfico que representa as condições normais de visão. Como ambas as distâncias são iguais as respostas cerebrais são conjugadas. A segunda coluna ilustra a visão 3D através de imagens estereoscópicas; neste caso a distância de acomodação, i.e., a distância dos olhos ao ecrã, é fixa sendo a distância de convergência ajustada através do conteúdo do

ecrã. Existe assim uma disparidade entre a distância de convergência e distância de acomodação, representada graficamente através da linha horizontal vermelha.

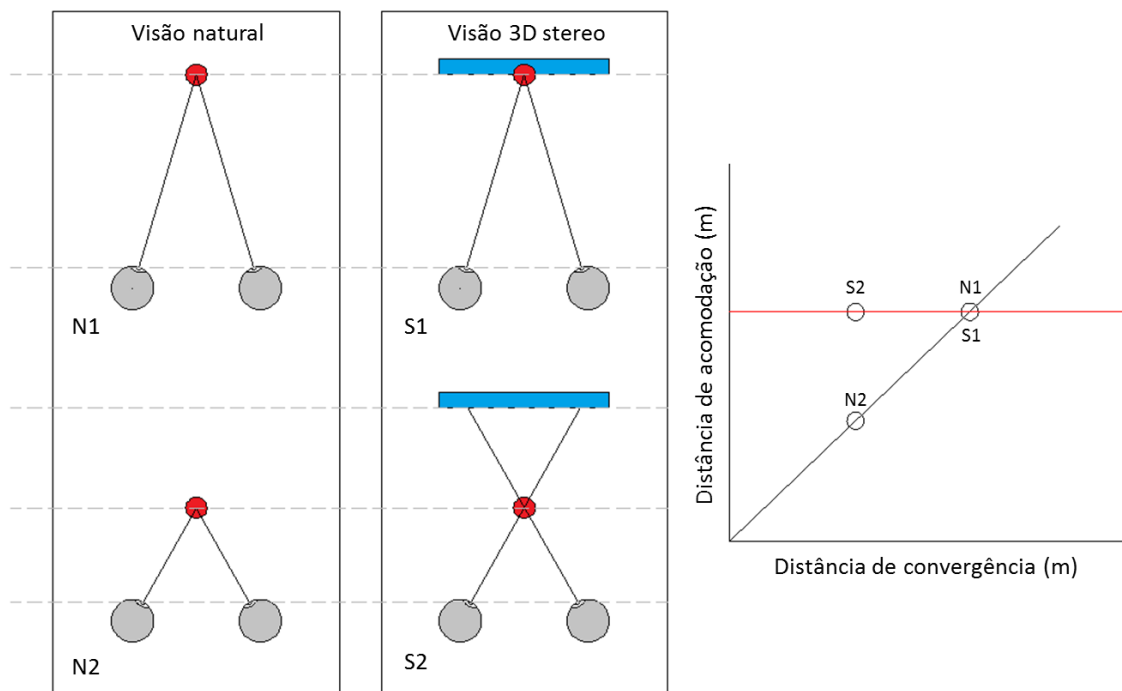


Figura 3.4 – Distâncias de convergência e acomodação para varias situações: À direita, as 2 colunas representam situações de visão natural (N) e situações de visão 3D estéreo. À esquerda encontra-se a representação gráfica da distância de acomodação em função da distância de convergência para as 4 situações apresentadas. Adaptada de [4].

Os nossos olhos conseguem tolerar pequenas quantidades de desfocagem na retina sem que seja necessário ajustar a acomodação, mantendo mesmo assim a percepção de uma imagem nítida. A profundidade de focagem, *DOF (Depth Of Focus)* quantifica a desfocagem na retina na qual a acomodação não se altera e as imagens são percebidas focadas. A profundidade de focagem não depende da visão estereoscópica: cada olho tem um *DOF* independente. Este é definido pela zona onde a imagem se encontra mais nítida; desvios na profundidade da imagem diminuem gradualmente a qualidade da imagem através do aparecimento de neblina, i.e. a imagem aparece desfocada. O *DOF* é influenciado por inúmeros factores como o contraste, luminosidade e frequência espacial da imagem, e também por factores fisiológicos como o tamanho da pupila e a idade. O *DOF* varia entre as 0,04 e 3,50 dioptrias, com valores típicos entre as 0,2 e 0,5 dioptrias [24].

Ao exibir imagens estereoscópicas se a convergência das imagens se encontrar dentro do limite do *DOF* não existirá problema em reconstruir a imagem na retina. À medida que se altera a disparidade das imagens e consequentemente a convergência, o limite do *DOF* irá ser ultrapassado originado assim a disparidade entre a convergência e acomodação. O sistema de

acomodação/convergência é capaz de suportar alguma quantidade deste conflito, apesar de criar *stress* ao sistema visual do utilizador e consequentemente desconforto. A gama de variantes da dicotomia acomodação e convergência onde se consegue percepcionar as imagens sem erros excessivos é chamada de zona de visão binocular limpa, ZCSBV (*Zone of Clear Single Binocular Vision*). Se a disparidade entre a acomodação e convergência aumentar para fora desta zona dois fenómenos podem ocorrer: perda de acomodação, resultando numa imagem desfocada; ou perda de convergência, resultando em visão dupla (diplopia) [5].

Actualmente o valor da disparidade entre a acomodação e convergência que serve de base para a exibição de conteúdo 3D é de 1° . Este valor é calculado a partir das características do DOF. Para valores maiores assume-se que as imagens causam desconforto visual ao utilizador [25].

Através dos HMD algumas opções estão hoje em dia disponíveis para minimizar este problema. A solução está na alteração do plano focal da imagem. Num HMD isso é possível concebendo um desenho óptico que altera a distância da imagem virtual ao olho. Esta opção não está disponível em outras tecnologias que exibem imagens estereoscópicas como a televisão ou o cinema, pois é logisticamente impossível deslocar o ecrã entre uma grande gama de distâncias.

Uma das opções mais simples para o desenho óptico de um HMD que altere o plano focal da imagem é mover o ecrã relativamente à ocular, Figura 3.5. Tratando-se de uma lente positiva se o ecrã for movido entre a lente e a distância focal da ocular altera-se a distância da imagem virtual ao olho.

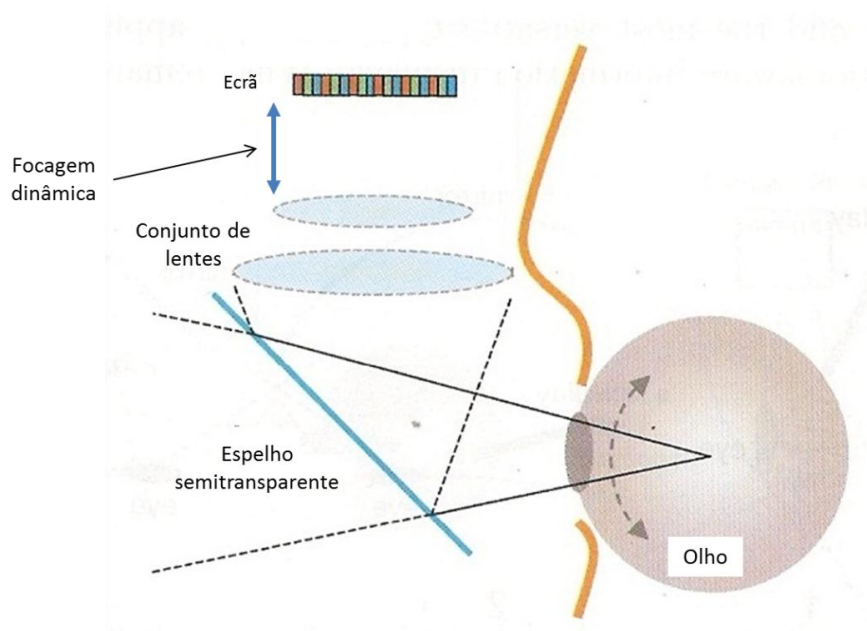


Figura 3.5 – Desenho óptico para um HMD com alteração do plano focal da imagem. Adaptada de [6].

Protótipos com diferentes configurações têm vindo a ser desenvolvidos com o intuito de estudar o desconforto causado pela disparidade entre a acomodação visual e a convergência. Os protótipos desenvolvidos e os estudos feitos em [26] e [27] são as principais referências que provaram e quantificaram os efeitos causados por essa disparidade.

O primeiro recorre apenas a um monitor LCD e a vários divisores de feixe para criar três planos focais diferentes. Devido à falta de componentes ópticos convergentes este protótipo apresenta planos focais bastante pequenos de 53,6 cm, 39,4 cm e 31,1 cm. As publicações realizadas com este protótipo, [3] e [28], foram as primeiras a mostrar convincentemente o conflito entre a acomodação e a convergência.

No segundo protótipo o princípio do sistema óptico é alterar o plano focal da imagem através de uma lente birrefringente. Este tipo de lente altera o seu índice de refração consoante a polarização da luz, bastando assim adicionar ao sistema óptico polarizadores lineares para obter vários planos focais. Este sistema permite obter 4 distâncias focais diferentes, 27 cm, 40 cm, 77 cm e 10 m. As experiências realizadas com este protótipo focaram-se essencialmente na determinação da zona de conforto entre a acomodação e a convergência [4]. Na Figura 3.6 estão esquematizados os resultados obtidos com este sistema. Estes gráficos relacionam a distância de acomodação com a distância de convergência e apresentam a zona de conforto entre as duas variáveis. A linha sólida a preto representa a linha de visão normal. As linhas sólidas a vermelho e azul representam os limites obtidos na experiência para que se tenha uma visão confortável. As linhas a tracejado representam os

vários dispositivos actualmente disponíveis no mercado que podem utilizar imagens estereoscópicas. A distância de focagem é para todos eles fixa.

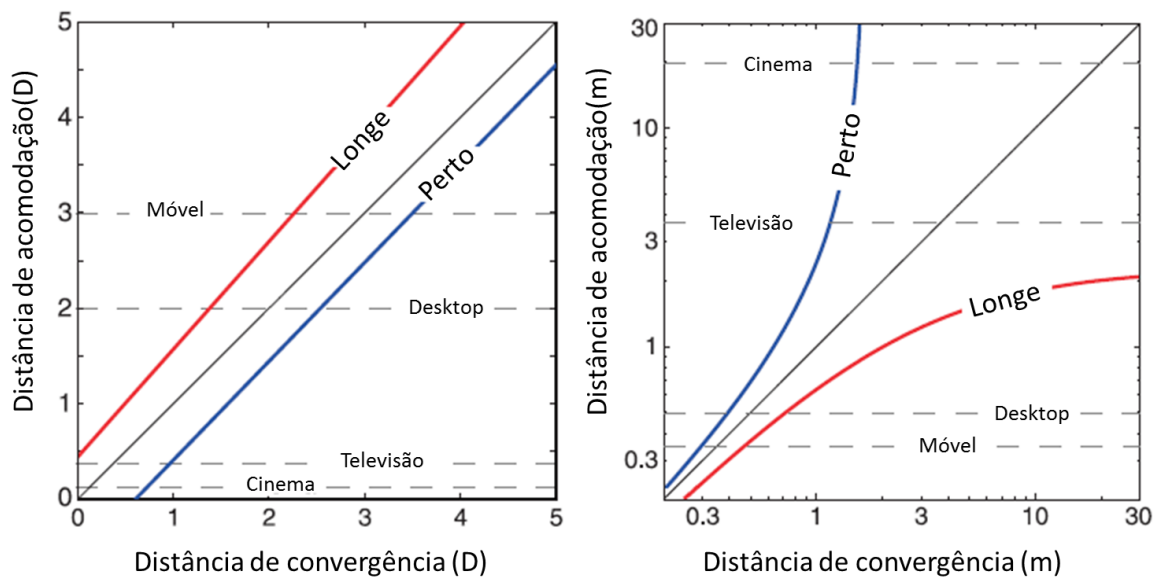


Figura 3.6 – Zona de conforto entre a acomodação e convergência. Do lado esquerdo é apresentado o resultado em dioptrias e no lado direito em metros. Adaptada de [4].

3.3.3 Percepção de profundidade entre objectos virtuais e reais

Uma das mais promissoras aplicações de um HMD estereoscópico é a sobreposição de imagens virtuais no mundo real; esta é também das aplicações mais desafiantes devido à dificuldade que o sistema visual humano pode ter na integração de informações a partir destes dois ambientes. Os olhos só conseguirão fundir as imagens estereoscópicas se a convergência do objecto 3D e do objecto real estiver dentro dos limites da área de *Panum*. Fora destes limites o utilizador irá sofrer de diplopia.

Existem várias causas que poderão levar a uma imprecisão na profundidade das imagens virtuais: qualquer desalinhamento lateral dos ecrãs em relação ao eixo óptico causará um erro na profundidade do objecto a não ser que seja compensado computacionalmente; a posição dos dois ecrãs em relação ao conjunto óptico tem de ser a mesma, pois determina a magnificação das imagens monoculares. Uma magnificação diferente para os dois olhos causa um erro sistemático na profundidade dos objectos virtuais.

A diferença da distância interpupilar de pessoa para pessoa é também uma das características que altera a percepção estereó. Podemos distinguir três tipos de distâncias interpupilares num HMD: a distância interpupilar do utilizador; a separação do eixo óptico dos dois sistemas ópticos monoculares; e a separação lateral usada para a criação de imagens

estereoscópicas computacionalmente. Na maioria dos sistemas as duas últimas distâncias estão fixas, o que poderá criar imprecisão na profundidade dos objectos virtuais e fazer com que pessoas com uma distância interpupilar pequena atinjam os limites de fusão rapidamente [5][29].

Capítulo 4 – Projecto e Concepção de um HMD

O projecto baseou-se num protótipo de um *HMD* monocular *see-through* já existente na *Lusospace*. A fonte de vídeo é um micro-ecrã da *eMagin*, com uma interface da mesma marca que permite o controlo da luminosidade e da orientação horizontal. O desenho óptico inclui uma ocular *RKE 28mm* da *Edmund Optics* e um espelho com índices de refacção e transmissão 50/50 na gama do visível da mesma marca. Todas as partes estavam fixas. Na Figura 4.1 esquematiza-se o sistema e na Figura 4.2 uma fotografia do protótipo.

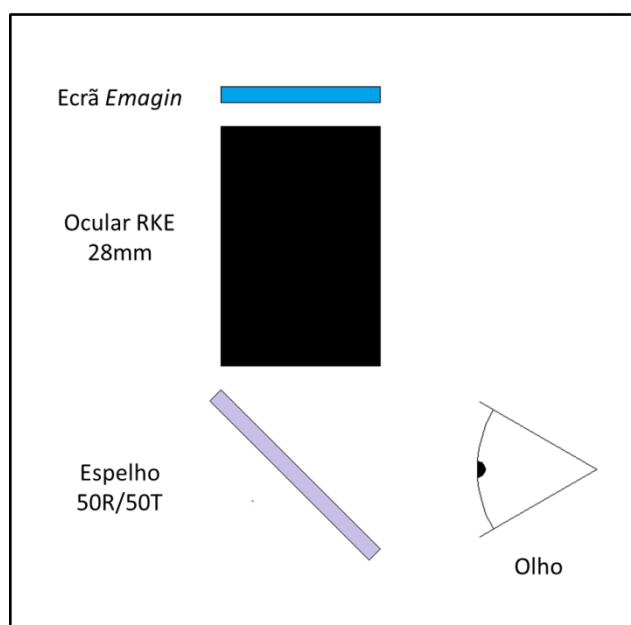


Figura 4.1 – Esquema do HMD monocular existente na *Lusospace*.



Figura 4.2 – Fotografia do HMD monocular existente na *Lusospace*.

A finalidade deste projecto foi a partir deste modelo criar um sistema binocular que permitisse a alteração do plano focal da imagem; deste modo foi necessário duplicar este sistema de modo a permitir o controlo de dois ecrãs em separado. Esta modificação do protótipo anterior é fundamental para o estudo do efeito de imagens estereoscópicas.

4.1 Electrónica

4.1.1 Ecrãs

Foram utilizados dois micro-ecrãs SVGA+ Color OLED da *eMagin*. Estes ecrãs são ideais para a concepção de HMD devido ao seu pequeno tamanho e boa resolução. Os ecrãs usados foram adquiridos em 2005 mas ainda asseguram todos os requisitos necessários para a elaboração deste projecto. Na Figura 4.3 encontra-se uma imagem dos ecrãs usados ao lado de uma moeda para poder comparar o seu tamanho.



Figura 4.3 – Micro-ecrãs SVGA+ Color OLED da *eMagin* [30].

Os ecrãs da *eMagin* são construídos sobre um circuito que controla e processa o sinal de vídeo, resultando numa acondicionamento de pequenas dimensões, maior fiabilidade,

robustez e eficiência. Cada *pixel* contém 3 riscas verticais que representam as 3 cores primárias (vermelho, verde e azul), através da combinação das intensidades das 3 cores é possível reproduzir mais de 16,7 milhões de cores. Na Tabela 4.1 estão as características destes micro-ecrãs.

Tabela 4.1 – Características gerais dos micro-ecrãs SVGA+ Color OLED da eMagin [30].

Características gerais	
Formato de vídeo	852 x 600 (16:9) 800 x 600 (4:3 SVGA) 640 x 480 (4:3 VGA)
Aspecto e tamanho dos <i>pixels</i>	Quadrados de 15 μm
Arranjo da cor dos <i>pixels</i>	R,G,B riscas verticais
Área de visão	12,78 x 9,00 mm
Involucro mecânico	19,78 x 15,20 x 5,00 mm
Taxa de contraste	$\geq 100:1$
Luminosidade máxima	$\geq 70 \text{ cd/m}^2$
Sinal de vídeo	
R, G, B	0 a 0,7 V; compatível com o padrão VESA VSIS
Frame rate	30 a 85 Hz
Interface de controlo	Digital 3,3 V CMOS

O circuito permite o ajuste do ganho (contraste) e do *offset* (brilho) de cada sinal de vídeo R, G, B individualmente. Duas tensões de referência, *v_{bh}* e *V_{black}*, podem ser igualmente ajustadas externamente permitindo o controlo da luminosidade e do contraste respectivamente [30].

4.1.2 Controladores

De modo a ligar-se os sinais de vídeo, alimentação, transmissão e recepção de dados, foram adquiridos controladores específicos para os ecrãs usados. Os controladores adquiridos foram os *O5 Zif* da *TekGear* que ficam responsáveis pela conversão da alimentação 5 V DC/3 V DC (permitindo alimentar os micro-ecrãs através de uma fonte USB), pela inicialização dos ecrãs e pela resolução de vídeo automática. O ajuste da luminosidade pode ser feito através de um interruptor físico ou através de uma interface de controlo UART.

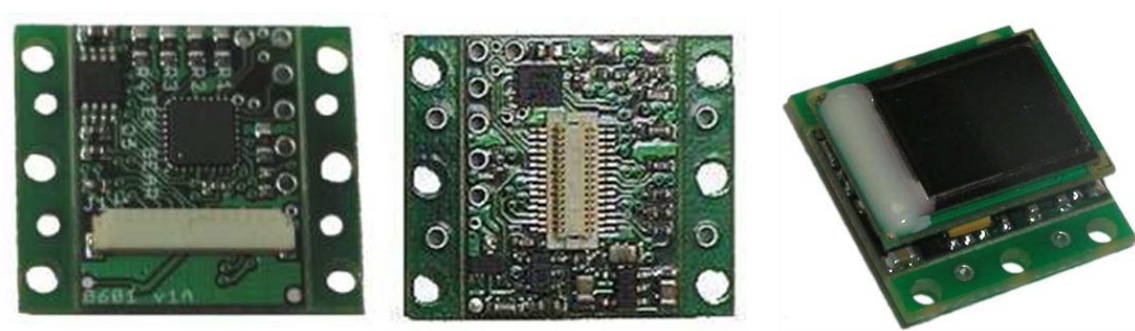


Figura 4.4 – Controlador O5 Zif da TekGear. Da esquerda para a direita: vista inferior do controlador; vista superior do controlador; micro-ecrã SVGA+ Color OLED da eMagin conectado ao controlador [31].

Estes controladores apresentam conectores de 14 pinos onde são ligados os 5 sinais de vídeo e de sincronização (R, G, B, HSYNC e VSYNC), a alimentação (5 V DC), a transmissão e recepção de dados (Tx, Rx), e os respectivos *grounds*.

Os controladores O5 permitem através da ligação ou remoção de 4 resistências de 0 Ohms o controlo de vários parâmetros. Estas resistências funcionam como *jumpers*, sendo responsáveis por desviar, ligar ou desligar a corrente eléctrica, permitindo configurações específicas por meio físico do *hardware* em questão. As resistências encontravam-se inicialmente todas soldadas representando assim a configuração padrão. Os parâmetros que podem ser configurados através delas são os seguintes:

- Formato de vídeo: PAL ou NTSC. A principal diferença entre os dois formatos é a frequência de fotogramas por segundo. O formato PAL apresenta uma frequência de 50 *fps* e é mais usado na Europa enquanto o NTSC apresenta uma frequência de 60 *fps* sendo mais utilizado nos Estados Unidos da América. Actualmente os computadores permitem ajustar a frequência do sinal de saída podendo ser usada qualquer uma delas, por isso decidiu-se usar o formato predefinido que era o NTSC.
- Tipo de OLED eMagin: SVGA+ ou SVGA-3D. Depende do tipo de micro-ecrã da eMagin que está ligado ao O5. Para este projecto foram utilizados micro-ecrãs SVGA+.
- Direcção de varredura vertical: cima para baixo ou baixo para cima. Define a orientação vertical da imagem. Por definição o O5 faz a varredura de cima para baixo. Ao retirar-se a resistência a imagem inverte verticalmente. Usou-se a definição padrão.
- Direcção de varredura horizontal: da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda. Define a orientação horizontal da imagem. Para este projecto foi retirada esta resistência porque a imagem inverte horizontalmente devido ao desenho óptico

implementado. Deste modo para o correcto visionamento das imagens necessitamos de uma varredura horizontal da direita para esquerda [31].

Na Figura 4.5 observa-se a localização das resistências no controlador e na Tabela 4.2 os parâmetros que poderão ser controlados através das mesmas.

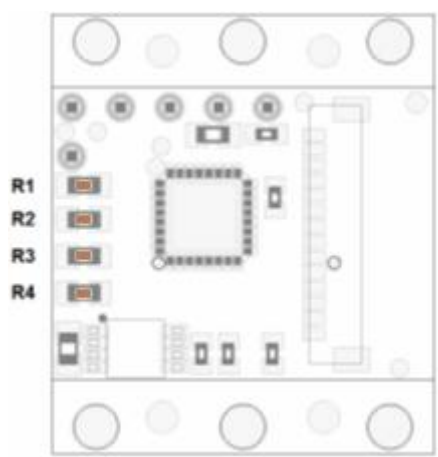


Figura 4.5 – Esquema do controlador O5 com destaque às 4 resistências de 0 Ohms removíveis [31].

Tabela 4.2 – Parâmetros ajustáveis através das resistências [31].

Função	Resistência	Curto-circuito (padrão)	Circuito aberto
Formato de vídeo	R1	NTSC	PAL
Tipo de OLED <i>eMagin</i>	R2	SVGA+	SVGA-3D
Direcção de varredura vertical	R3	Cima para baixo	Baixo para cima
Direcção de varredura horizontal	R4	Esquerda para direita	Direita para esquerda

4.1.3 Módulo de expansão gráfica

O *Matrox DualHead2Go* é uma unidade externa *multidisplay* que permite ligar dois monitores a partir de uma única saída VGA; faz uso da placa gráfica existente no computador a que está ligado para fornecer alta qualidade, gráficos e vídeo para todos os monitores. Este equipamento tem uma interface bastante fácil que permite criar um ambiente de trabalho estendido com uma resolução máxima de 3.840x1.200 (2 x 1.920 x 1.200) em dois monitores, sendo possível abrir uma aplicação em cada monitor independentemente ou estende-la ao longo dos dois monitores.



Figura 4.6 - Matrox DualHead2Go Digital Edition [32].

Este equipamento vai permitir ligar os dois micro-ecrãs a uma única fonte de vídeo VGA, mantendo a possibilidade de controlar o envio de imagens individualmente. As resoluções aceites pelos displays são de 800x600, por isso vai ser necessário transmitir a partir do computador uma resolução de 1.600x600 (2x 800x600) para que o *DualHead2Go* envie para cada ecrã a resolução de 800x600 pretendida.

Este equipamento apresenta uma edição analógica e outra digital. A escolhida para este projecto foi a edição digital pois disponibiliza a resolução de 1.600x600 pretendida, ao contrário do analógico que apresenta uma resolução mínima de 2.048x768 (2x 1.024x768). A edição digital apresenta uma entrada de sinal de vídeo VGA, que será ligada ao computador, e duas saídas DVI-I. Estas saídas apesar de serem usadas para sinais de vídeo digitais, transportam também os sinais de vídeo analógicos, sendo por isso possível ligar equipamentos que recebem qualquer um dos dois tipos de sinal [32].

4.1.4 Sinal de vídeo

O sinal de vídeo usado está dentro do protocolo *VSIS (Video Signal Standard)* da *VESA (Video Electronics Standards Association)*. Este protocolo define para a transmissão das imagens 5 sinais de saída: 3 sinais de vídeo (R, G e B) e dois sinais de sincronização (*HSYNC* e *VSYNC*).

Os sinais de vídeo R, G e B são sinais de tensão analógicos entre os 0 e os 0,7 V (0 V corresponde à luminosidade mínima e os 0,7 V à luminosidade máxima). Cada *pixel* está dividido em três riscas, que receberam o sinal de vídeo R, G ou B correspondente. Através da combinação das três cores é possível reproduzir quase todo o espectro visível. A paleta de

cores usada é de 24 bits, 8 bits para cada sinal, que representam um total de $(2^8)^3=16.777.216$ cores [30].

Os sinais de sincronização determinam a resolução do ecrã e a taxa de reprodução (*frame rate*). São sinais quadrados com uma tensão mínima entre os 0 e os 0,5 V, que representam o valor lógico “0”, e tensão máxima entre os 2,4 e os 5,5 V que representa o valor lógico “1”. Para uma resolução de 800x600 (SVGA) com uma taxa de reprodução de 60 *fps* (*frames per second*), o sinal de sincronismo horizontal apresenta uma frequência de 37,8 KHz, correspondendo a um período de 3,2 μ s, tempo para percorrer os 800 *pixels* horizontais de cada linha e reiniciar. O sinal de sincronismo vertical apresenta uma frequência de 60 Hz, período de 106 μ s, tempo para percorrer todos os 800x600 *pixels* e reiniciar.

Na Figura 4.7 estão esquematizadas as várias etapas do sinal de vídeo. A fonte do sinal de vídeo é o computador, que produz um sinal RGB com uma resolução de 1.600x600 *pixels*, 60 *fps* e 24 bits de cores. A ligação à unidade de expansão gráfica *DualHead2Go* é feita através de um cabo VGA, esta unidade irá produzir dois sinais com uma resolução de 800x600 cada, que são transmitidos para os respectivos controladores. Para finalizar os controladores transmitem as imagens aos micro-ecrãs, que reproduzem as imagens fornecidas pela fonte.

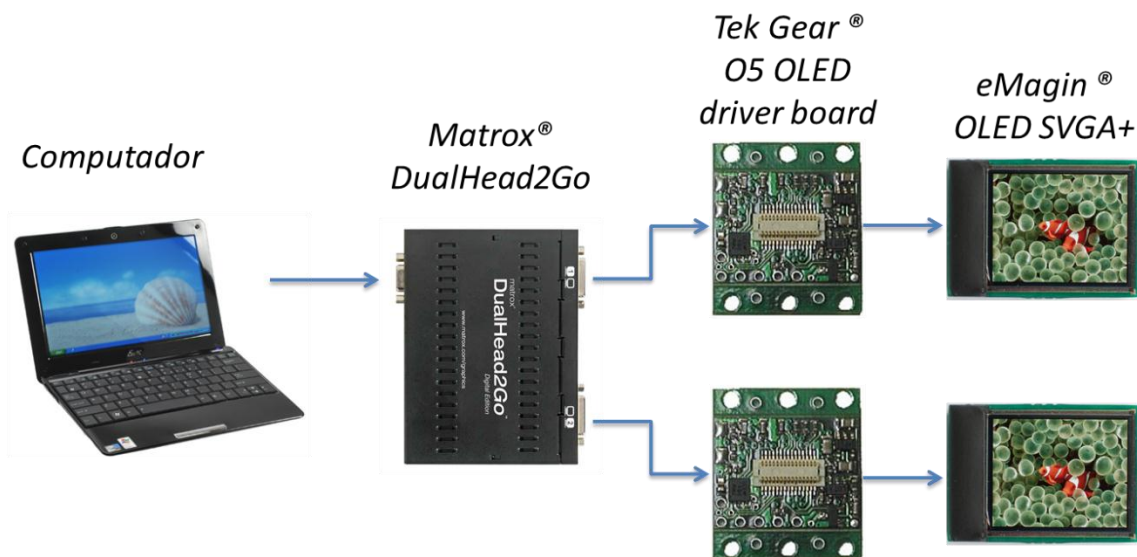


Figura 4.7 – Esquema das várias etapas do sinal de vídeo.

4.1.5 Alimentação, transmissão e recepção de dados

A saída UART do controlador foi convertida para USB 2.0 usando um cabo do fabricante *Future Technology Devices International* (FTDI), o TTL-232R-3V3. Este cabo possui um integrado, FT232R, capaz de fazer a gestão automática do protocolo USB. Possui uma gama de taxas de transferência de dados entre os 300 b/s e os 3 Mb/s, *buffers* de envio e recepção FIFO (*First In, First Out*) e é certificado segundo os padrões do USB [33].

Este cabo transporta também o sinal de alimentação fornecido pela porta USB do computador de +5 V, permitindo também fazer a alimentação dos controladores e ecrãs.

Os sinais de alimentação e dados dos dois controladores O5 são ligados em paralelo ao cabo TTL-232R-3V3. A Figura 4.8 esquematiza as ligações feitas.

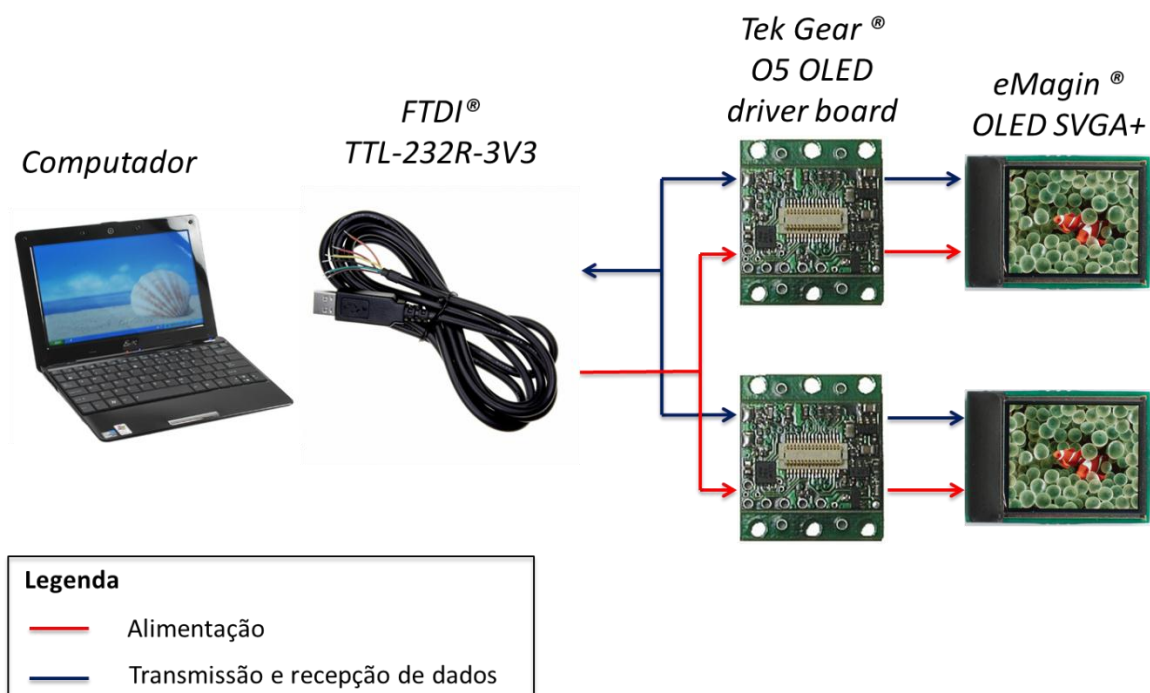


Figura 4.8 – Esquema dos sinais de alimentação e dados.

4.1.6 Implementação

Para a implementação da electrónica descrita anteriormente desenvolveu-se uma caixa (descrita em pormenor no capítulo 4.4) que contém os micro-ecrãs e os controladores. Concebeu-se também um cabo que contém as duas entradas de vídeo para a cada micro ecrã, e o cabo USB. Para uma fácil ligação entre a caixa e o cabo foi usado um conector DB25.

Dentro da caixa são feitas as seguintes ligações: a ligação entre os controladores e os micro-ecrãs é feita directamente através de conectores de 30 pinos em ambos os dispositivos; a cada controlador está ligado um integrado através de um cabo flexível; este integrado permite soldar os fios que transportam os vários sinais sendo depois ligados a um conector DB25 macho, à excepção dos fios da alimentação (+5 V), que são ligados em série com a um interruptor, permitindo ligar e desligar facilmente os micro-ecrãs. Na Figura 4.9 estão esquematizadas as ligações dentro da caixa e na Figura 4.10 a fotografia da sua implementação.

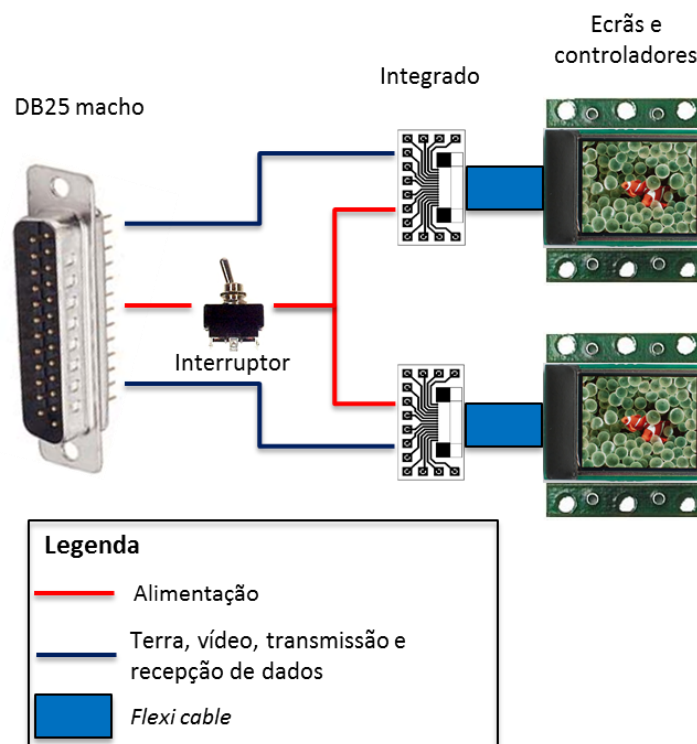


Figura 4.9 – Esquema das ligações eléctricas dentro da caixa.

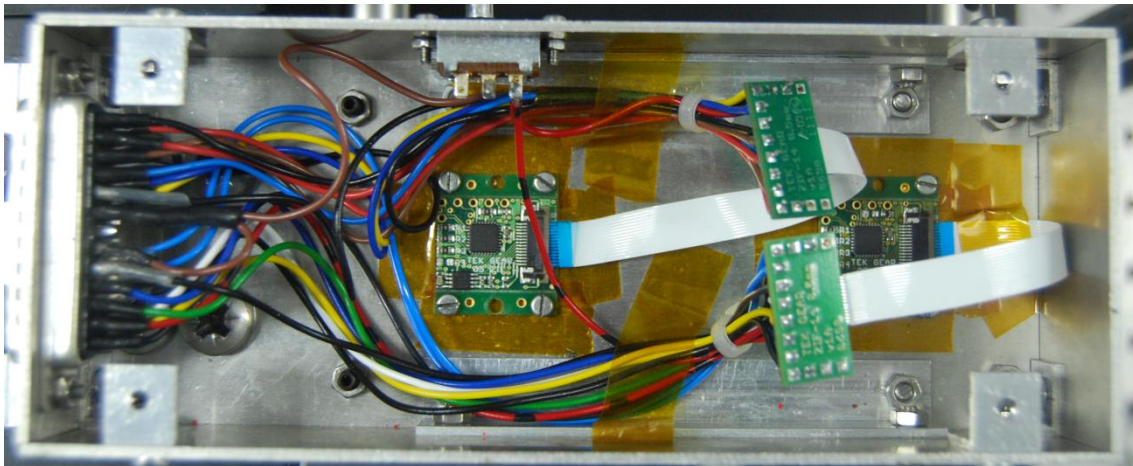


Figura 4.10 – Fotografia das ligações eléctricas dentro da caixa.

O cabo implementado contém numa das extremidades um conector de DB25 fêmea, e na extremidade oposta encontram-se dois conectores DE15 (que transportam os sinais SVGA) e o cabo USB (para alimentação, transmissão e recepção de dados).



Figura 4.11 – Fotografia do cabo implementado.

4.2 Interface

Os controladores *O5* permitem o ajuste de vários parâmetros do micro-ecrã como a luminosidade, o ganho e o *offset* através da ligação UART. Desenvolveu-se assim uma aplicação em *LabVIEW* que permite o controlo de ambos os controladores *O5*.

4.2.1 Protocolo de comunicação

A interface física entre o controle remoto e o controlador *O5* é uma interface UART padrão, com tensões de sinalização de 3,3 V para o estado lógico “1” e 0 V para estado lógico “0”. Opera a uma velocidade de 9600 *baud* e o formato do *frame* é de 1 *start bit*, 8 *data bits*, *no parity* e 1 *stop bit*. A natureza da interface UART exige um transmissor e um receptor no barramento UART. Para tal foi utilizado um cabo *USB TTL Serial* da *FTDI* (*Future Technology Devices Internacional*). Este cabo converte *USB* em *serial* permitindo a conectividade entre *USB* e interfaces *UART*.

Os controladores *O5* possibilitam uma comunicação *half duplex*. Os pacotes de dados transmitidos pelo controlo remoto são recebidos por ambos os controladores. O pacote identifica para que controlador a informação se destina, podendo-se aplicar ao dispositivo da “esquerda”, da “direita”, ou “ambos” . Um pacote que seja endereçado para um controlador em particular será apenas processado por esse controlador, o outro irá ignorar o pacote. Um interruptor físico no *hardware* do controlador garante este processo. Para definir se o controlador é “esquerdo” ou “direito” existe uma resistência de 0 Ohms, Figura 4.12, que poderá ser removida ou colocada. A resistência vem colocada de fábrica definindo o controlador como “esquerdo”; retirando a resistência define-se o controlador como “direito”. Esta resistência foi retirada em um dos controladores.

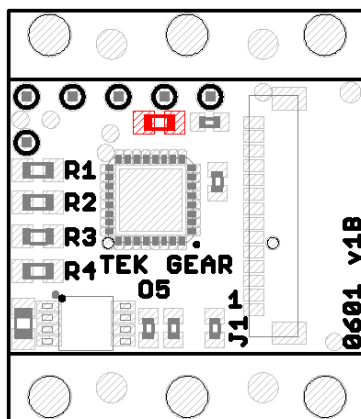


Figura 4.12 – Esquema do controlador *O5* da *TekGear* evidenciando a vermelho a resistência de 0 Ohms que permite definir se o controlador é “esquerdo” ou “direito” [34].

Comandos que solicitam informações a serem enviadas a partir dos *O5s* devem ser dirigidos a um *O5* específico. A interface UART não permite múltiplos transmissores em apenas um condutor, o que significa que não é possível que ambas as placas *O5* comuniquem simultaneamente de volta para o controlo remoto através da mesma ligação UART.

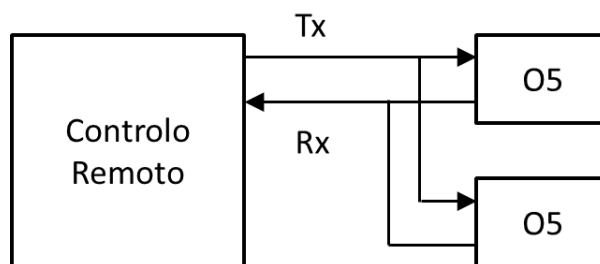


Figura 4.13 - Comunicação *half duplex* [34].

O controlador *O5* é capaz de funcionar de dois modos: controlo por comandos ou controlo manual. O controlo por comandos possibilita o envio de comandos através da ligação UART. O controlo manual apenas permite ajustar a luminosidade através dos pinos *Rx*, *Tx* e terra: curto-circuitando o pino *Rx* e a terra aumenta a luminosidade; curto-circuitando o pino *Tx* e a terra diminui a luminosidade; curto-circuitando os 3 pinos, restitui a iluminação padrão. As configurações de luminosidade são guardadas automaticamente quando se libertam os pinos, sendo recuperadas no próximo ciclo de arranque.

Por defeito o *O5* inicializa no modo de controlo por comandos. Quando se liga o controlador, este demora 1 segundo a executar a sua própria configuração, período durante o qual não está disponível para receber comandos. O *O5* permanece no modo de controlo por comandos, se pelo menos um pacote completo for correctamente recebido no prazo de quatro segundos depois do arranque do controlador. Se um pacote não for recebido entre 1 e 4 segundos após o arranque, o *O5* muda para controlo manual, deixando de ser possível enviar comandos para o *O5* [34].

4.2.2 Formato do pacote de dados

De modo a alterar os diversos parâmetros do micro-ecrã uma sequência de 3 *bytes* tem de ser enviada aos controladores: um *byte* de comando, responsável pela identificação do receptor ao qual o pacote se destina e pelo parâmetro que se pretende alterar; *byte* de dados, responsável por definir o novo valor do parâmetro emitido no *byte* de comando; e o *byte* de verificação, presente para validar os dados que são recebidos pelo controlador.

Byte de comando

O *byte* de comando é o primeiro dos três *bytes* do pacote, e é responsável pela identificação do receptor ao qual o pacote se destina e pelo parâmetro que se pretende controlar. O pacote pode ser endereçado para o controlador “esquerdo”, “direito” ou para “ambos”.

Os parâmetros que podem ser ajustados no *byte de comando* são os seguintes:

- **Luminosidade** – Controla a luminosidade do ecrã.
- **Vblack** – Controla a tensão de referência *Vblack*.
- **Ganho** – Controla a amplificação do sinal de entrada. Cada sinal de saída (vermelho, verde, azul ou mono) pode ser amplificado individualmente, ou podem ser ajustados em conjunto.
- **Offset** – Controla o deslocamento DC do sinal de entrada. Poder ser aplicado individualmente ou em conjunto como o parâmetro de ganho.
- **Opções** – Controla uma selecção de características auxiliares no O5 e no OLED.
- **Guardar configurações** - Guarda as configurações actuais na memória não-volátil.
- **Carregar configurações** - Carrega as configurações padrão ou as gravadas na memória não-volátil e permite ler os parâmetros actuais do controlador.

Byte de Dados

A gama de valores permitidos no *byte de dados* depende do parâmetro emitido no *byte de comando*. Os valores fora desta gama de valores são ignorados pelo controlador. Na Tabela 4.3 encontra-se a gama de valores possíveis do *byte de dados* para os vários parâmetros emitidos no *byte de comando* e sua descrição.

Tabela 4.3 – Tabela da gama de valores possíveis no *byte de dados* para cada parâmetro e sua descrição.

Comando	Gama de valores (valor padrão)	Descrição
Luminosidade	0-255 (192)	0-mínimo 255-máximo
Vblack	0-255 (103)	0 – 3,50 V 255 – 3,75 V
Ganho	0-255 (127)	0 – 50% de amplificação 255 – 150% de amplificação
Offset	0-127 (48)	0 – 50% DC <i>offset</i> 127 – 150% DC <i>offset</i>
Opções	0-3 (1 e 2)	0 – Desliga a luminosidade 1 – Liga a luminosidade 2 – Desliga escala cinza 3 – Liga escala cinza
Guardar configurações	0	0 – Guarda as configurações actuais
Guardar configurações	0-2	0 – Carrega os valores guardados 1 – Carrega os valores padrão 2 – Leitura das configurações actuais

Byte de verificação

O *byte* de verificação está presente para validar os dados que são recebidos pelo controlador. Se este valor não for igual ao calculado pelo controlador o pacote é ignorado.

O *byte* de verificação é calculado pela adição do *byte* de comando conjuntamente com o *byte* de dados, em representação hexadecimal, para criar uma soma X. O valor de X é então assegurado que cai dentro do intervalo de 0 a 255, o que é feito através da realização de um módulo 256 criando o valor Y. Por último, em notação binário, inverte-se o *bit* um a um do valor de Y e adiciona-se 1, criando-se um valor Z que será o *byte* de verificação [34].

4.2.3 Interface *LabVIEW*

A interface implementada em *LabVIEW* pretende ser simples e intuitiva ao utilizador. Na Figura 4.14 está o fluxograma do programa principal onde se altera o valor dos parâmetros. Basicamente se algum dos valores de luminosidade, ganho, *offset* e *Vblack* for alterado pelo utilizador o programa envia a sequência de 3 *bytes* ao *O5* pretendido. Os comandos das opções, guardar e carregar configurações estão disponíveis em forma de botões que ao serem pressionados enviam o pacote ao *O5* destinatário. No caso dos comandos de ganho e *offset* é possível também seleccionar o sinal (R, G, B) que se pretende modificar.

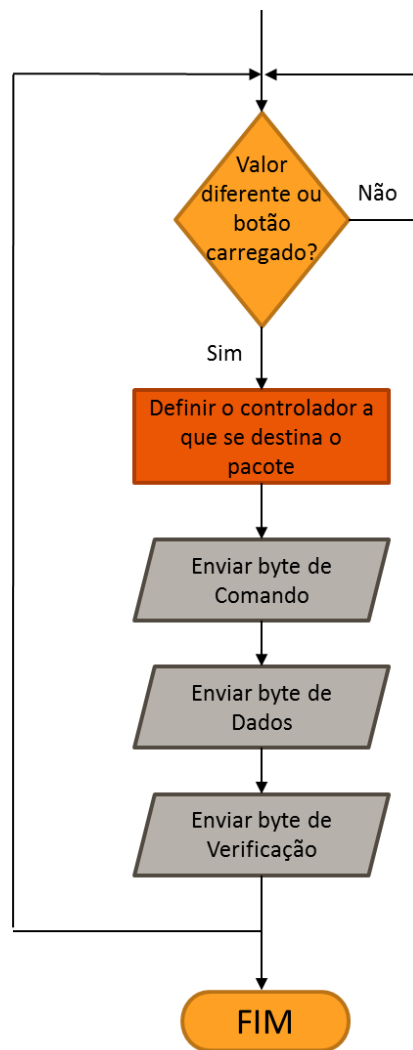


Figura 4.14 – Fluxograma principal do *software*.

Como é necessário enviar um pacote de dados correcto entre 1 a 4 segundos depois do arranque dos controladores algumas considerações tiveram de se ter em conta. Na Figura 4.15 está representado o fluxograma da inicialização do programa. Após todos os passos esquematizados, o programa entra rotina principal do programa representada na Figura 4.14.

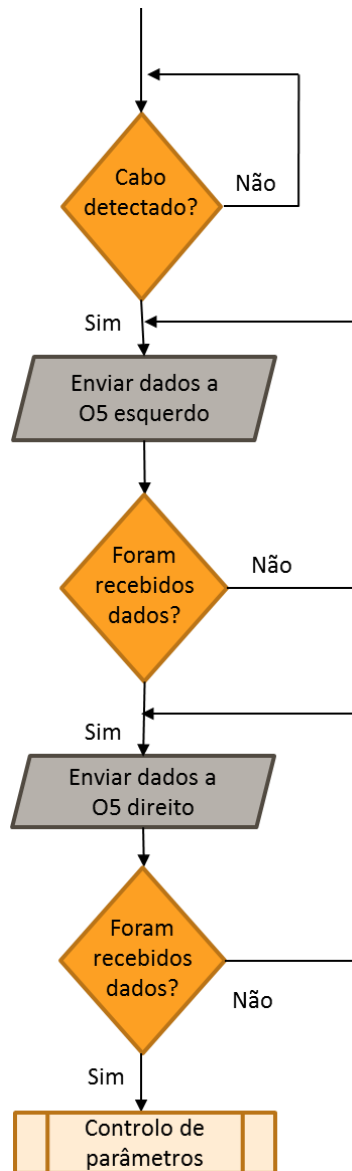


Figura 4.15 – Fluxograma da rotina de inicialização.

Para que se obtenha o modo de controlo por comandos nos O5 é necessário seguir os seguintes passos:

- Inicializar a interface no *LabVIEW*.
- Ligar cabo USB ao computador. Esta informação será visível na janela de estado do programa.
- Quando o cabo for detectado pelo programa este irá solicitar que se ligue o interruptor de alimentação dos controladores.
- O programa nesta fase envia continuamente o comando que lê as configurações actuais dos controladores. O controlador quando receber este comando irá enviar para o computador um pacote de 12 *bytes*.

- Quando se liga o interruptor o programa detecta os dados enviados pelos controladores. Uma informação irá aparecer quando forem detectados.
- Quando ambos os controladores forem detectados o programa está pronto, podendo-se alterar os parâmetros disponíveis.

A interface está representada na Figura 4.16, onde se mostra o menu principal do programa. Na Figura 4.17 encontra-se a menu auxiliar do programa onde se encontra o protocolo de comunicação e informações sobre os dados enviados e recebidos.

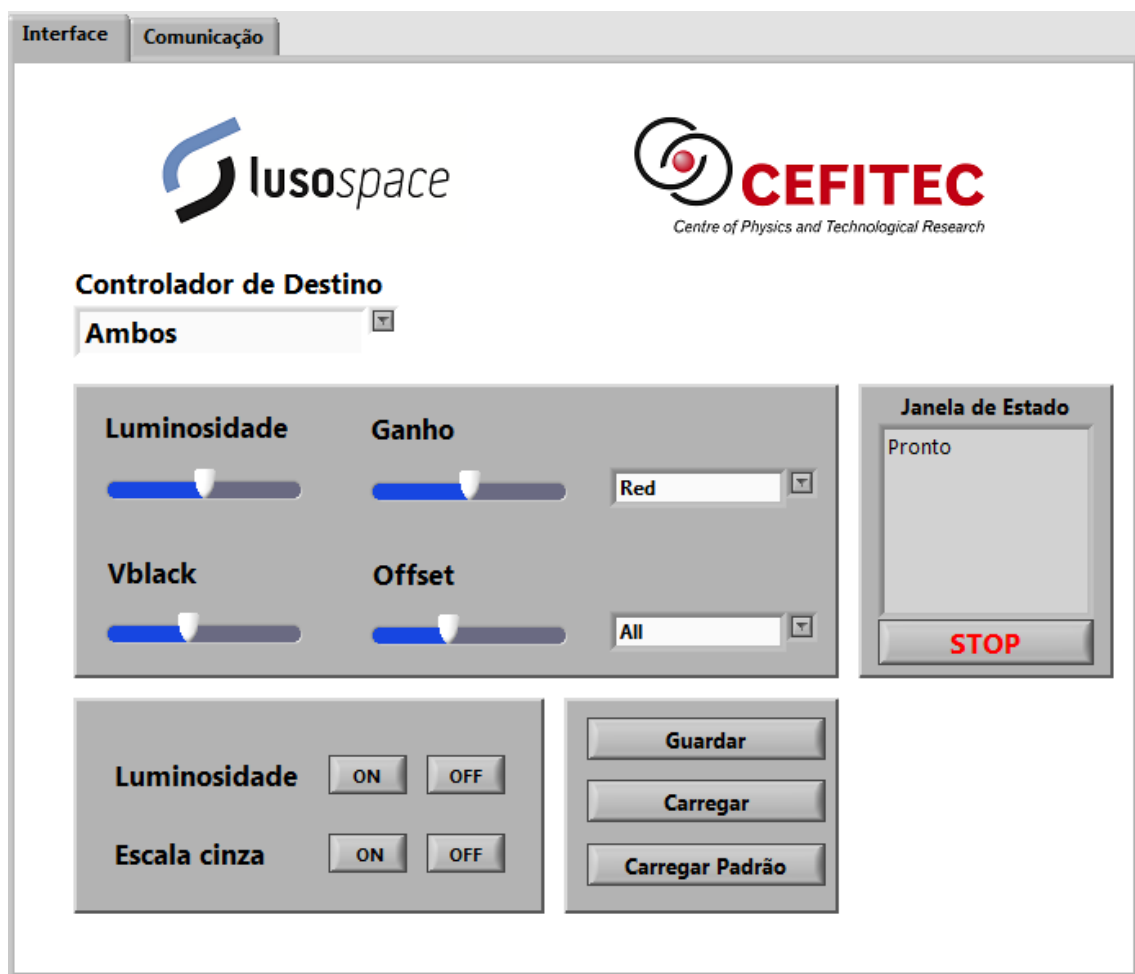


Figura 4.16 – Interface *LabVIEW*.

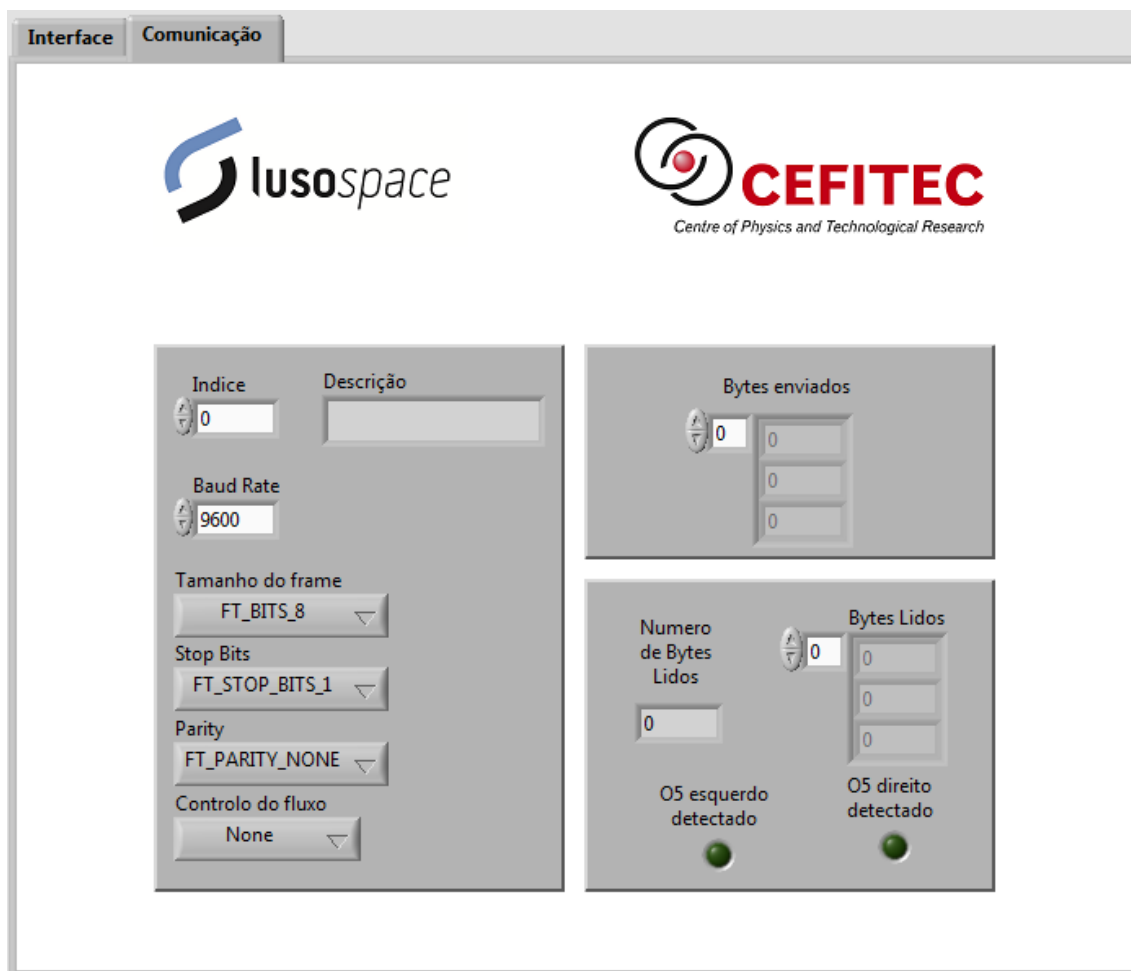


Figura 4.17 - Interface *LabVIEW*, menu de comunicação.

4.3 Desenho óptico

Neste capítulo analisa-se o sistema óptico usado que consiste resumidamente numa ocular e num espelho de índices de transmissão e refração 50/50. Para alterar o plano focal da imagem o método utilizado foi a alteração da distância entre o micro-ecrã e a ocular, deste modo altera-se a distância da imagem virtual gerada ao olho.

4.3.1 RKE 28 mm

A ocular utilizada foi a mesma que a do protótipo já existente, a ocular da RKE 28mm da *Edmund Optics*. A RKE tem uma lente de campo acromática e uma lente de olho convexa dupla convertendo-se numa adaptação invertida da ocular *Kellner*. Este sistema proporciona um campo de visão um pouco mais amplo que a configuração clássica de *Kellner* e assemelha-se a uma versão espaçada da configuração *König*. Segundo o fabricante a RKE 28mm apresenta

uma distância focal efectiva de 28 mm e uma distância focal anterior de 15,67 mm. Na Figura 4.18 encontra-se a simulação em *Zemax* apresentando raios com ângulos de 0°, 7,5°, 15° e 22,5°.

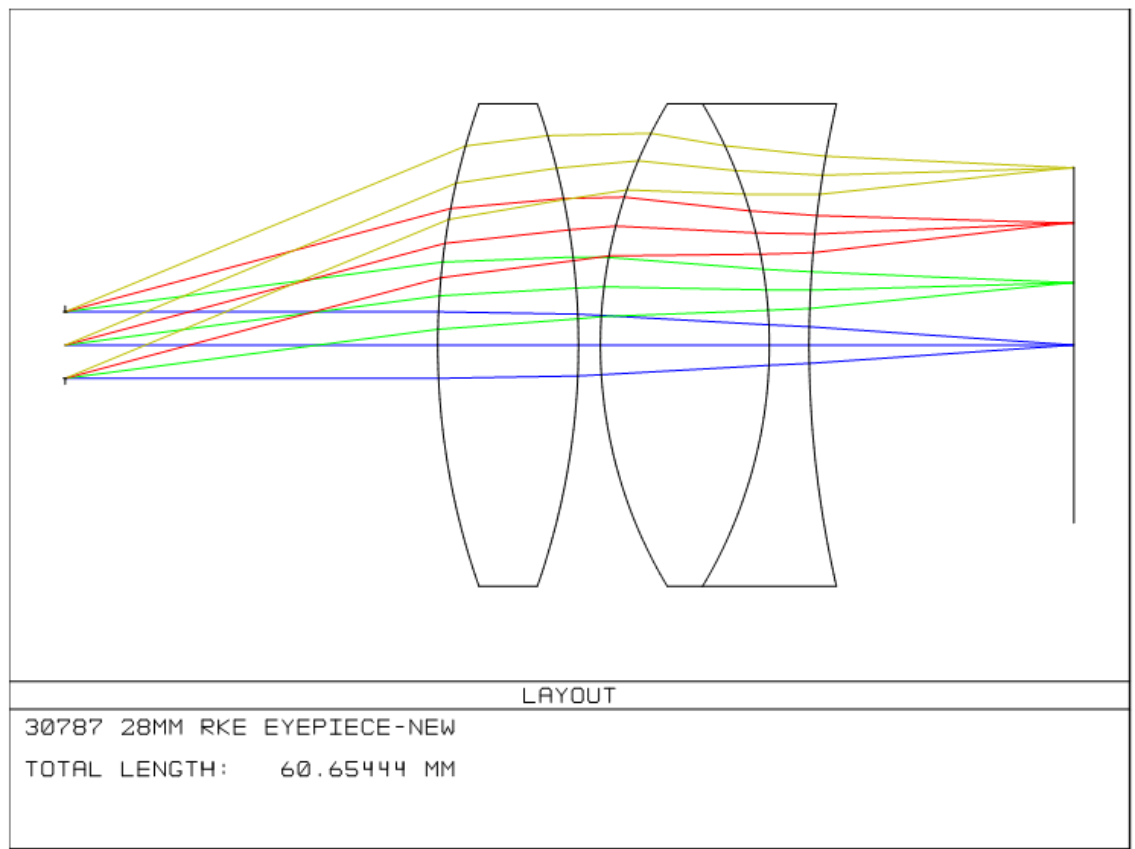


Figura 4.18 – Simulação em *Zemax* fornecida pelo fabricante.

Através do método matricial apresentado no capítulo 2.1.4, é possível obter a localização dos pontos focais e dos planos principais. Na Tabela 4.4 encontram-se os raios, distâncias e índices de refração das várias superfícies da ocular utilizada. Os valores obtidos para as distâncias dos planos principais aos vértices foi de $h_o = 12,92$ mm e $h_i = 0,25$ mm, e a distância focal efectiva de $EFL = 28,84$ mm. Na Figura 4.19 está esquematizado à escala o sistema óptico usado e a localização dos pontos calculados.

Tabela 4.4 – Raios, distâncias e índices de refração das várias superfícies do conjunto óptico

Raios (mm)		Distância entre superfícies (mm)		Índices de refração
$r_1 = -64,77$	$r_4 = 43,68$	$d_{21} = 2,39$	$d_{43} = 1,32$	$n_{SK5} = 1,589130$
$r_2 = 28,17$	$r_5 = -43,68$	$d_{32} = 10,16$	$d_{54} = 8,46$	$n_{SF4} = 1,755201$
$r_3 = -28,17$				$n_{ar} = 1$

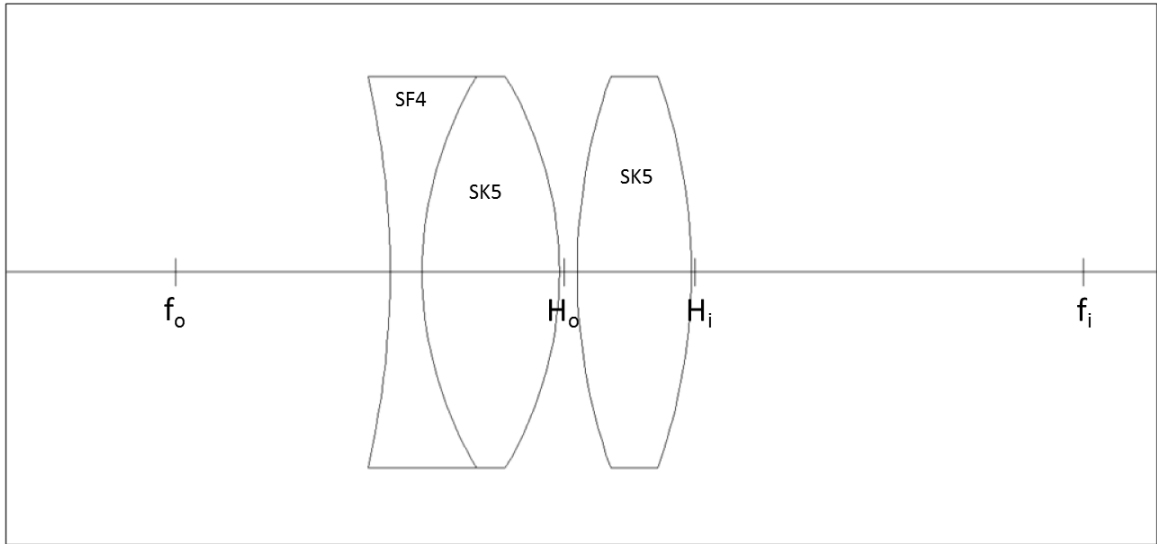


Figura 4.19 – Configuração da ocular RKE 28mm da *Edmund Optics*.

Com os valores dos planos principais e recorrendo à lei de Gauss pode-se obter a distância do plano focal em função da distância do micro-eclã à ocular, d_{me} .

$$\frac{1}{EFL} = \frac{1}{d_{me} + h_o} + \frac{1}{d_{olho} - h_i} \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$d_{pf} = \frac{29,0863 \cdot (12,6685 + d_{me})}{-15,9205 + d_{me}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

A distância do eclã ao primeiro vértice, d_{me} , varia entre 0 e $(f - h_o) = 15,9205$ mm que corresponde à distância focal posterior. Na Figura 4.20 está representado o gráfico da distância do plano focal em função da distância do eclã. De notar que o valor da distância do plano focal é negativa devido a ser uma imagem virtual, apresentando por convenção o sinal negativo.

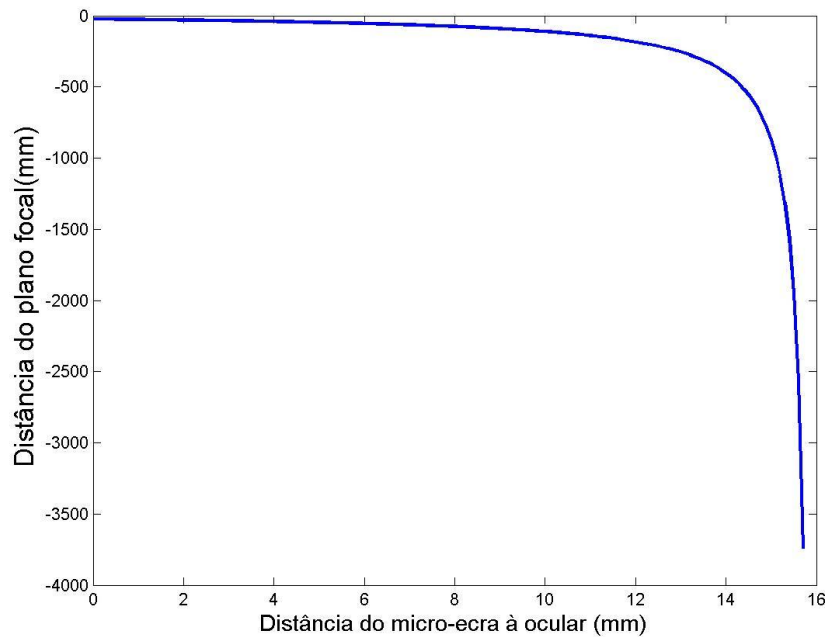


Figura 4.20 – Distância do plano focal da imagem em função da distância do micro-eclã à ocular.

4.3.2 Distância do plano focal

Com o intuito de se verificar a expressão teórica da distância do plano focal em função da distância do ecrã efectuou-se uma experiência. Para tal recorreu-se a uma lente de foco de 75 mm. Se esta lente for colocada entre determinadas distâncias surgirá uma imagem real que poderá ser focada num alvo podendo-se medir a distância entre a lente e o alvo. De seguida pode-se obter a distância do plano focal.

Na Figura 4.21 está esquematizado o estudo paraxial efectuado em *Zemax*. Neste teste considera-se numa primeira aproximação que a ocular tem um foco de 28 mm e a lente um foco de 75 mm. Como o objecto está dentro da distância focal da ocular irá ser gerada uma imagem virtual. Esta imagem virtual será o objecto da segunda lente, que como está a uma distância superior à sua distância focal, 75 mm, irá gerar uma imagem real que é focada num alvo. Através da medição da distância do micro-eclã à ocular e da distância do alvo poderemos calcular a distância da imagem virtual que é gerada pela ocular.

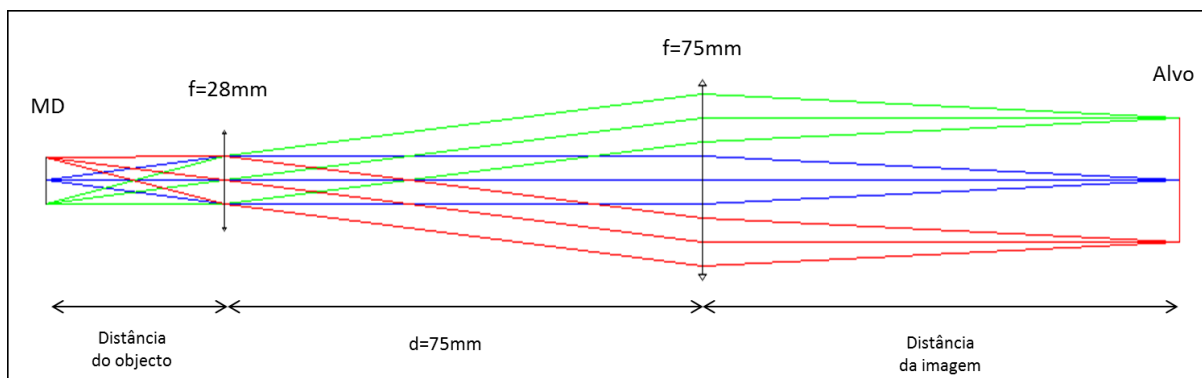


Figura 4.21 – Estudo paraxial da montagem experimental

A lente utilizada foi um duplete com distância focal efectiva de 75 mm e diâmetro de 25,4 mm (a referência do fabricante *ThorLabs* é AC254-075-A1). Na Tabela 4.5 encontram-se os raios, distâncias e índices de refração das várias superfícies da lente em estudo. Efectuou-se o estudo matricial para obter a localização dos planos principais da lente e a sua distância focal efectiva. Obteve-se $h_o = 1,64951$ mm, $h_i = -4,59293$ mm e $EFL = 74,8959$ mm. Na Figura 4.22 encontra esquematizado à escala o sistema usado e as várias distâncias calculadas.

Tabela 4.5 - Raios, distâncias e índices de refração das várias superfícies da lente AC254-075-A1 da *ThorLabs*.

Raios		Distância entre superfícies	Índices de refração	
$r_1 = 46,54$	$r_3 = -95,54$	$d_{21} = 7$	$n_{BK7} = 1,5168$	$n_{ar} = 1$
$r_2 = -33,91$		$d_{32} = 2,5$	$n_{SF5} = 1,672697$	

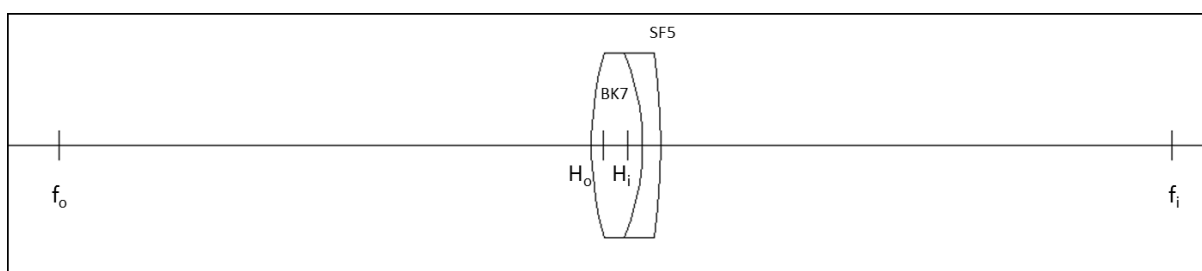


Figura 4.22 – Configuração da lente AC254-075-A1 da *ThorLabs*.

A relação entre a distância do objecto e a distância da imagem é dada pela Eq. 4.3.

$$si = \frac{70,303 \cdot (6,54249 + so)}{-73,2464 + so} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Juntando os dois conjuntos de lentes, obteve-se a localização dos planos principais, $h_o = 93,5021$ mm e $h_i = -213,912$ mm e a distância focal efectiva $EFL = 79,006$ mm.

Obteve-se assim a relação entre a distância do micro-ecrã e a distância do alvo, Eq. 4.4 e Eq. 4.5.

$$\frac{1}{EFL} = \frac{1}{d_{alvo} - h_i} + \frac{1}{d_{me} + h_o} \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$d_{alvo} = -\frac{134,906 (-31,7728 + d_{me})}{14,4961 + d_{me}} \quad \text{Eq. 4.5}$$

Na Figura 4.23 está esquematizado à escala o sistema experimental montado e na Figura 4.24 o gráfico esperado de acordo com a Eq. 4.5.

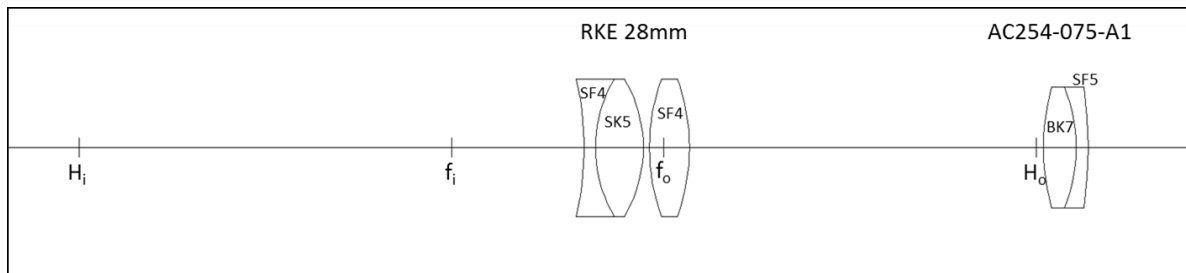


Figura 4.23 – Configuração das lentes da montagem experimental.

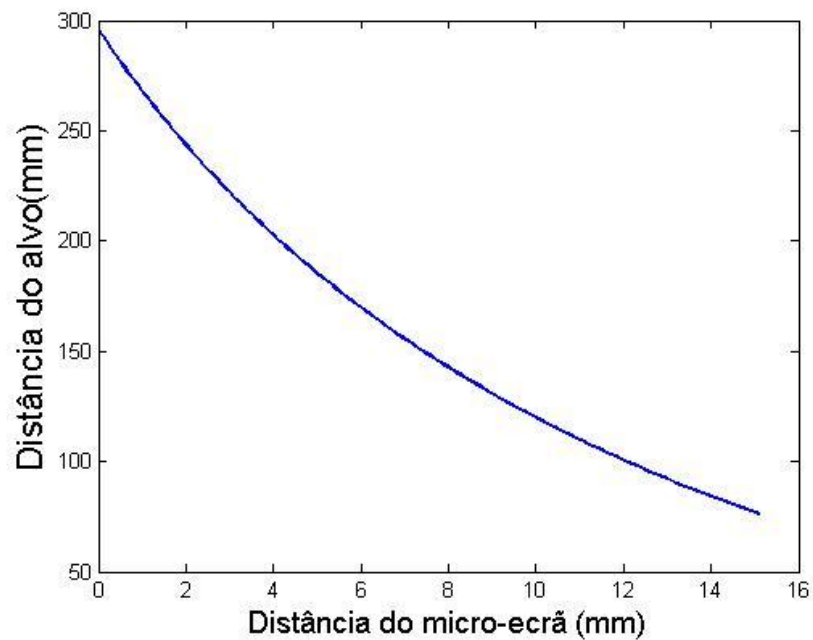


Figura 4.24 – Distância do alvo em função da distância do micro-ecrã.

Dados experimentais

Os dados obtidos da distância do alvo em função da distância ao micro-ecrã estão representados na Figura 4.25, onde se fez o ajuste obtendo-se a seguinte equação,

$$d_{alvo} = -\frac{95,49 (-36,25 + d_{me})}{12,35 + d_{me}} \quad \text{Eq. 4.6}$$

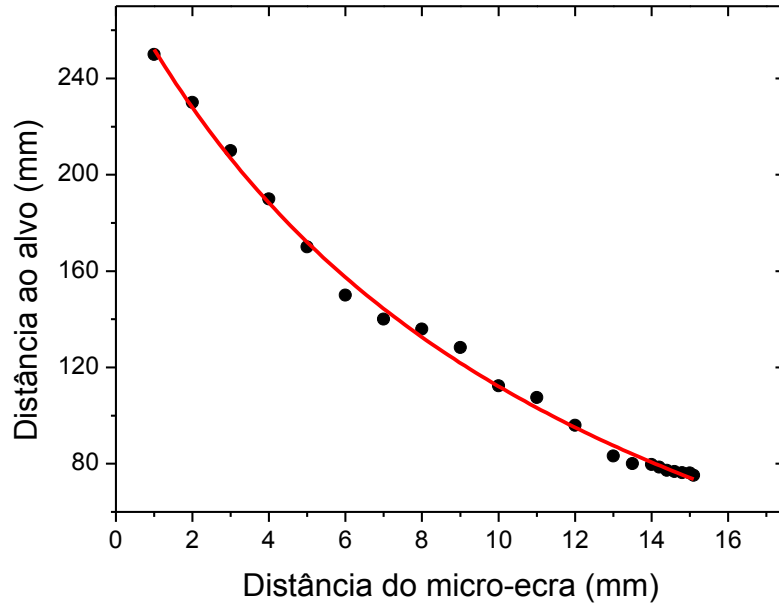


Figura 4.25 – Dados obtidos experimentalmente e respectivo ajuste.

A partir da Eq. 4.7 e dos valores obtidos experimentalmente, calculou-se a distância do objecto da lente de 75 mm, i.e., a distância da imagem virtual produzida pela ocular menos a distância entre a ocular e a lente (Eq. 4.8).

$$s_o = \frac{73,2464 (6,27958 + d_{alvo})}{-70,303 + d_{alvo}} \quad \text{Eq. 4.7}$$

$$d_{pf} = s_o - 75 \quad \text{Eq. 4.8}$$

Podemos assim obter a relação da distância do plano focal em função da distância do micro-ecriã para os dados obtidos experimentalmente e fazer o respectivo ajuste com a equação da ocular usada (Figura 4.26). A equação obtida foi,

$$d_{pf} = -\frac{132 (-1 + d_{me})}{-16,7 + d_{me}} \quad \text{Eq. 4.9}$$

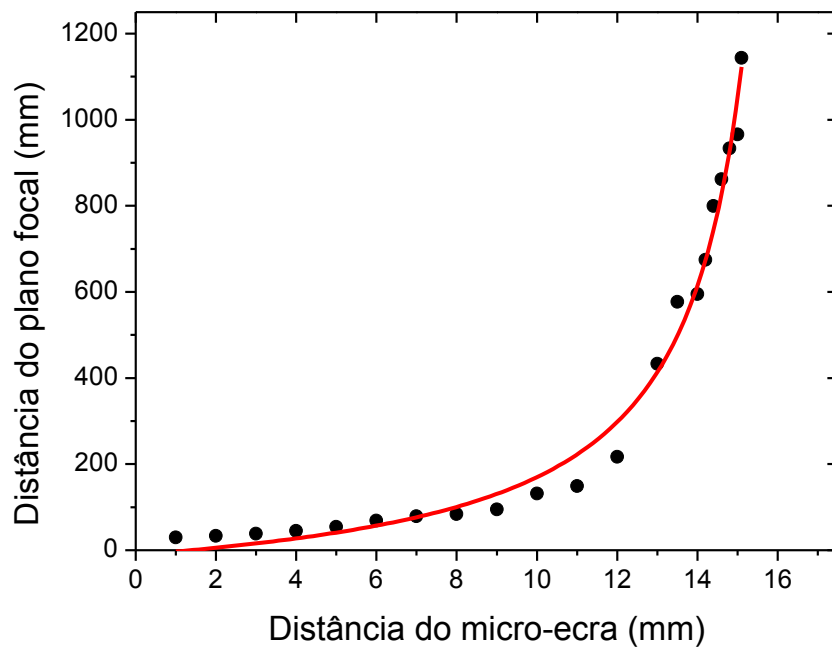


Figura 4.26 – Distância do plano focal, calculada a partir dos dados experimentais em função da distância do micro-ecria e respectivo ajuste.

4.3.3 Simulações com Sistema Completo

O desenho óptico completo usado está representado na Figura 4.27. Consiste numa ocular RKE 28mm da *Edmund Optics* e um espelho utilizado da *Edmund Optics* na gama do visível com taxas de transmissão e reflexão de 50% e com o tamanho de 25 x 38 x 3 mm.

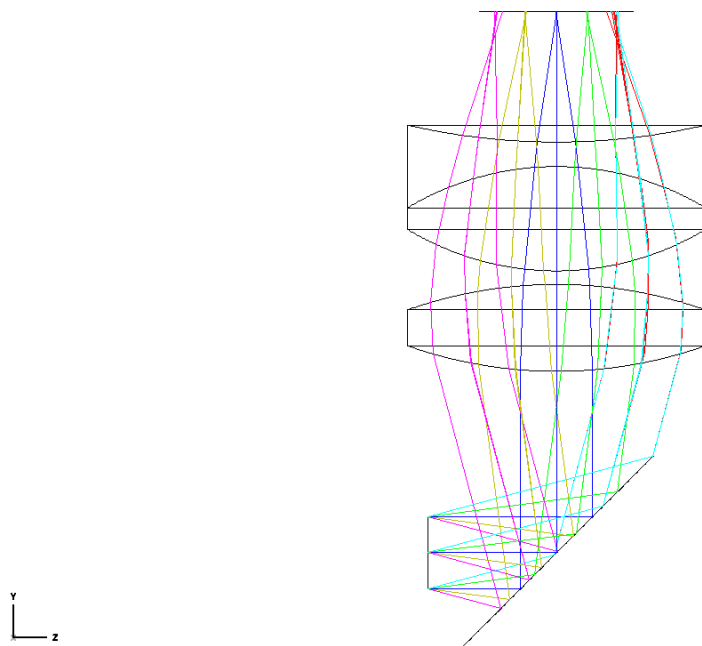


Figura 4.27 – Simulação do sistema completo em *Zemax*.

4.4 Sistema mecânico

Para obter-se um sistema capaz de alterar o plano focal de imagem projectou-se um desenho mecânico que permitiu alterar a distância entre os micro-ecrãs e as oculares. Dessa forma desenhadas duas caixas independentes, uma contendo os micro-ecrãs e outra contendo as oculares. Pretende-se que o utilizador mantenha a cabeça fixa durante a utilização do sistema e por isso decidiu-se manter a caixa que contém as oculares fixa, movimentando-se a caixa dos micro-ecrãs.

4.4.1 Projecto

O desenho projectado em *Autocad* da caixa que contém os micro-ecrãs, controladores, interruptor, conector DB25 e as respectivas ligações eléctricas, ver Figura 4.28. As faces foram concebidas para ter uma espessura de 1,5 mm e a união das faces foi feita com recurso a perfis rectos de 11,5 x 11,5 x 1,5 mm e diversos parafusos e porcas. O material utilizado nas caixas e perfis foi o alumínio. A caixa permite acoplar a peça C1505 da *ThorLabs*, que através de um poste com 350 mm de altura e 2,54 mm (1,5") de diâmetro, liga ao módulo de translação, permitindo o ajuste vertical do sistema.

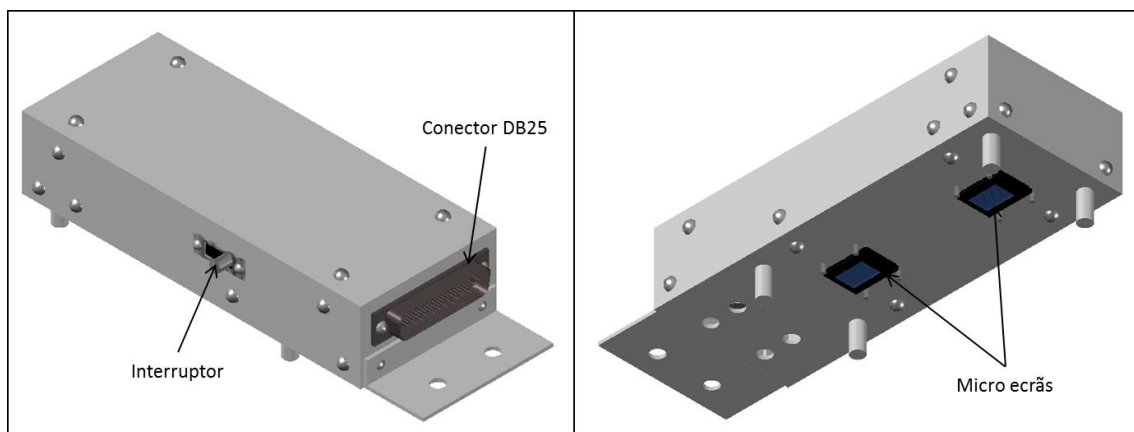


Figura 4.28 – Desenhos das perspectivas da caixa que comporta os micro-ecrãs.

A caixa projectada para conter as oculares e os espelhos encontra-se na Figura 4.29. As oculares usadas foram as 28mm EFL RKE da *Edmund Optics* e o espelho utilizado foi um *Beamsplitter* da *Edmund Optics* na gama do visível com taxas de transmissão e reflexão de 50% e com o tamanho de 25 x 38 x 3 mm.

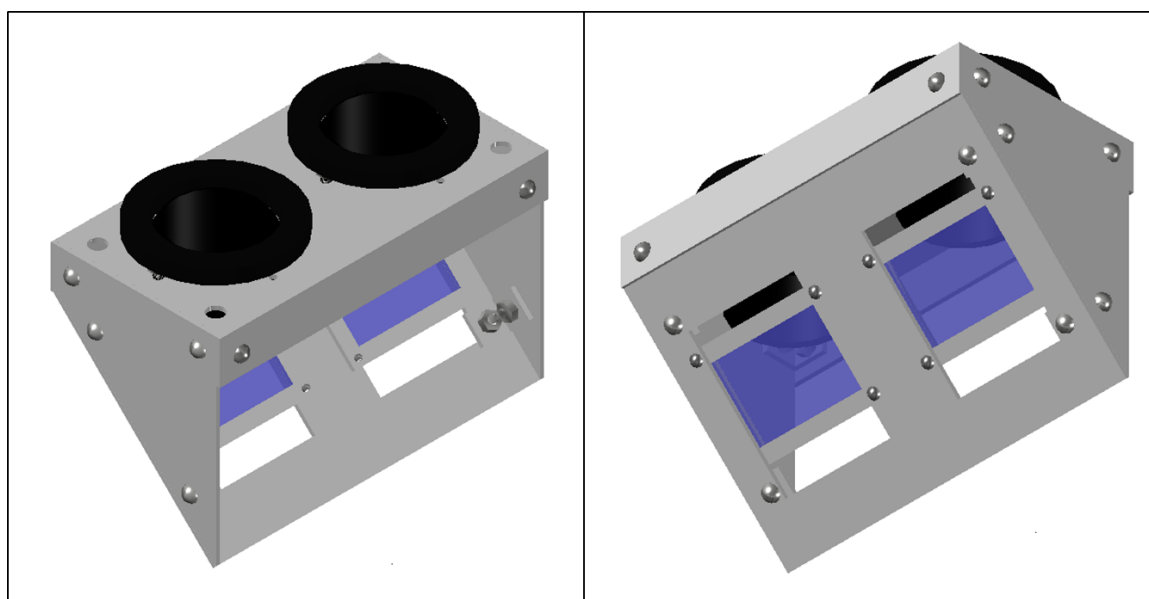


Figura 4.29 - Desenhos das perspectivas da caixa que suporta as oculares e os espelhos.

A face superior da caixa foi desenhada para o suporte das oculares. Dois tubos de 30 mm e tamanho de 2,54 mm (1") (peça *SM30L10* da *ThorLabs*) permitem a fixação do conjunto de lentes no seu interior. Estes tubos contêm uma rosca externa de 30 mm numa das extremidades o que permite enroscar uma peça *SM2A11* da *ThorLabs*, adaptador com uma rosca interna de 30 mm e uma rosca externa de 3,08 mm (2"). Esta peça permite a colocação de parafusos e fazer a ligação à folha de alumínio. Para permitir o controlo da inclinação das

oculares, foi montado um sistema de ajuste com porca e molas entre a face exterior da caixa e as adaptações SM2A11. Na Figura 4.30, a seguir, está esquematizado o sistema projectado.

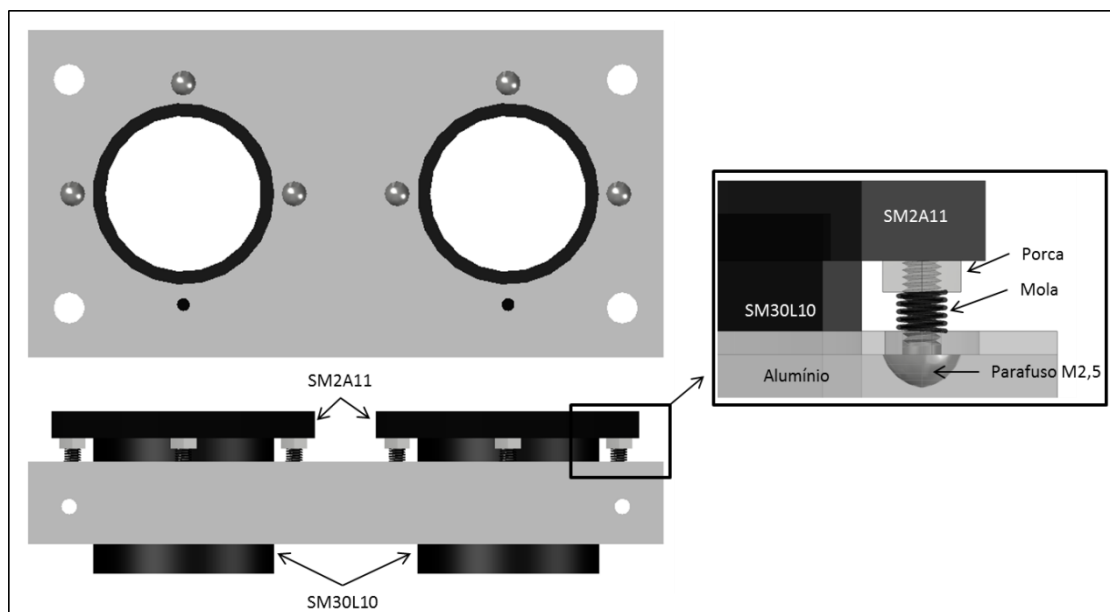


Figura 4.30 – Desenho da face superior, evidenciando o sistema que permite a inclinação das oculares.

Na face posterior onde se colocaram os espelhos foi igualmente montado um sistema que permite o movimento da inclinação dos mesmos. Para tal foi projectada uma peça que contém três roscas e onde se fixam os espelhos; assim novamente com o auxílio de molas e parafusos é possível ter esses 3 graus de liberdade. Este sistema está evidenciado na Figura 4.31.

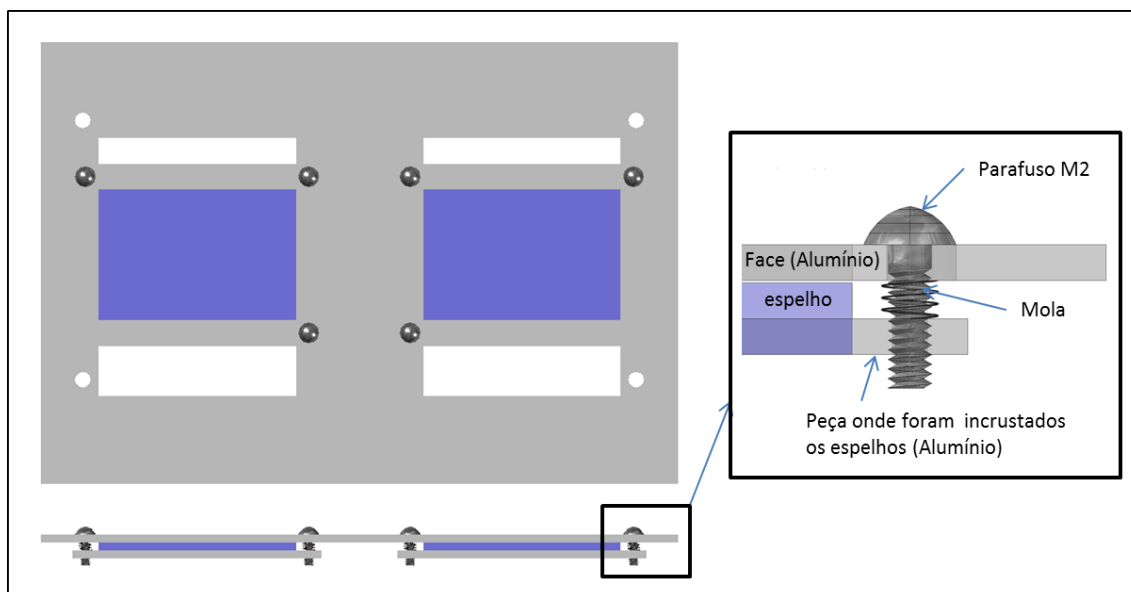


Figura 4.31 – Desenho da face posterior evidenciando o sistema que permite a inclinação dos espelhos.

O sistema completo encontra-se ilustrado na Figura 4.32. As duas caixas são montadas em quatro mini postes de 1,252 mm (1/2") de diâmetro e 6 mm de altura que estão unidos à caixa superior, mas que permitem o deslizamento pela face inferior.

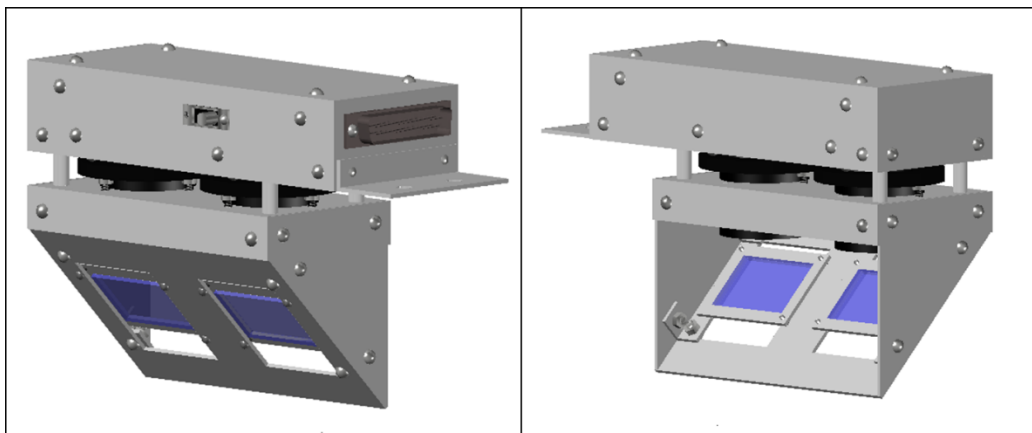


Figura 4.32 - Desenho final do projecto com as duas caixas.

4.4.2 Montagem geral

O sistema foi montado em cima de uma mesa óptica para uma maior facilidade no alinhamento dos vários elementos, e manutenção do mesmo evitando vibrações. Toda a estrutura das caixas são de alumínio com espessura de 1,5 mm. As peças que compõem o sistema foram projectadas em *AutoCAD* e posteriormente trabalhadas e cortadas na máquina *Bungard CNC*.

O sistema divide-se em duas partes; uma relacionada com a caixa dos ecrãs que contém diversos elementos que permitem a sua translação, Figura 4.33; e a parte relacionada com a óptica dos sistemas, que contém diversos elementos para se manter fixa, Figura 4.34.

Na Figura 4.35 encontra-se a fotografia com o sistema completo com todas as ligações necessárias ao seu funcionamento.

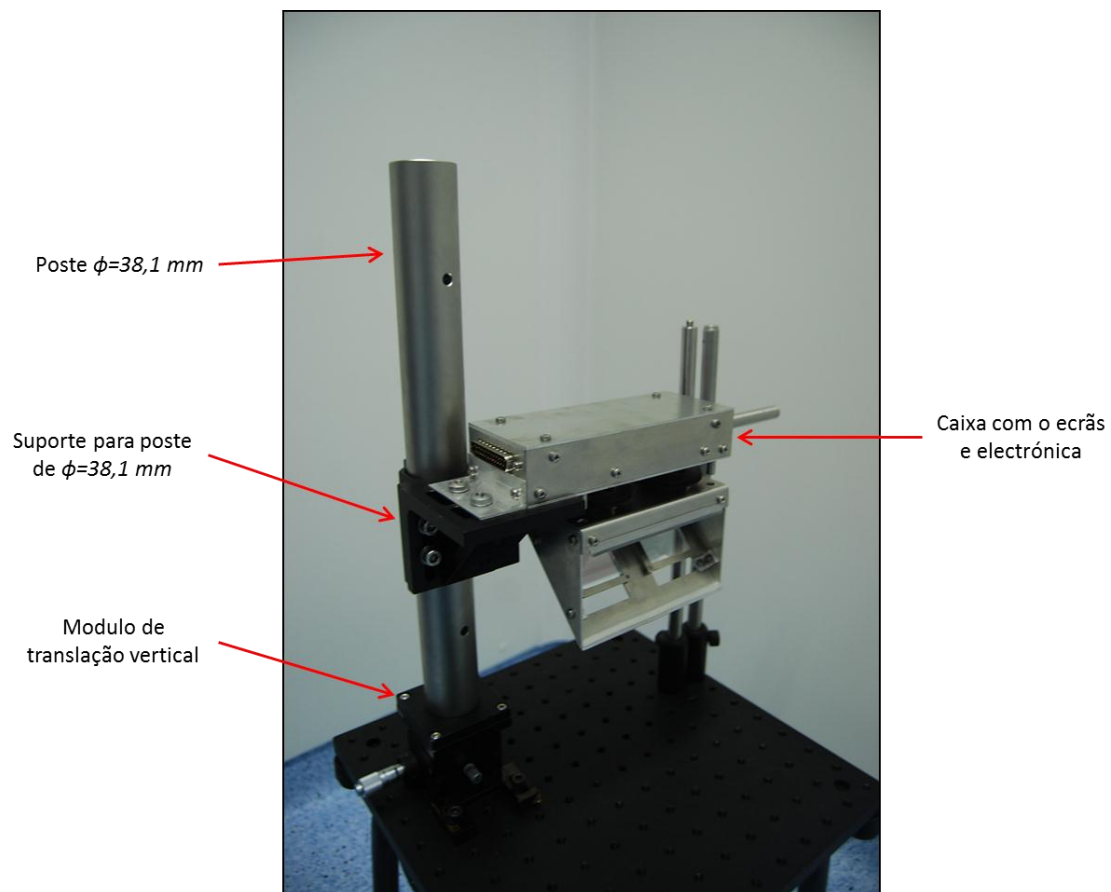


Figura 4.33 – Fotografia do sistema completo montado, evidenciando os vários elementos relacionados com a caixa dos ecrãs.

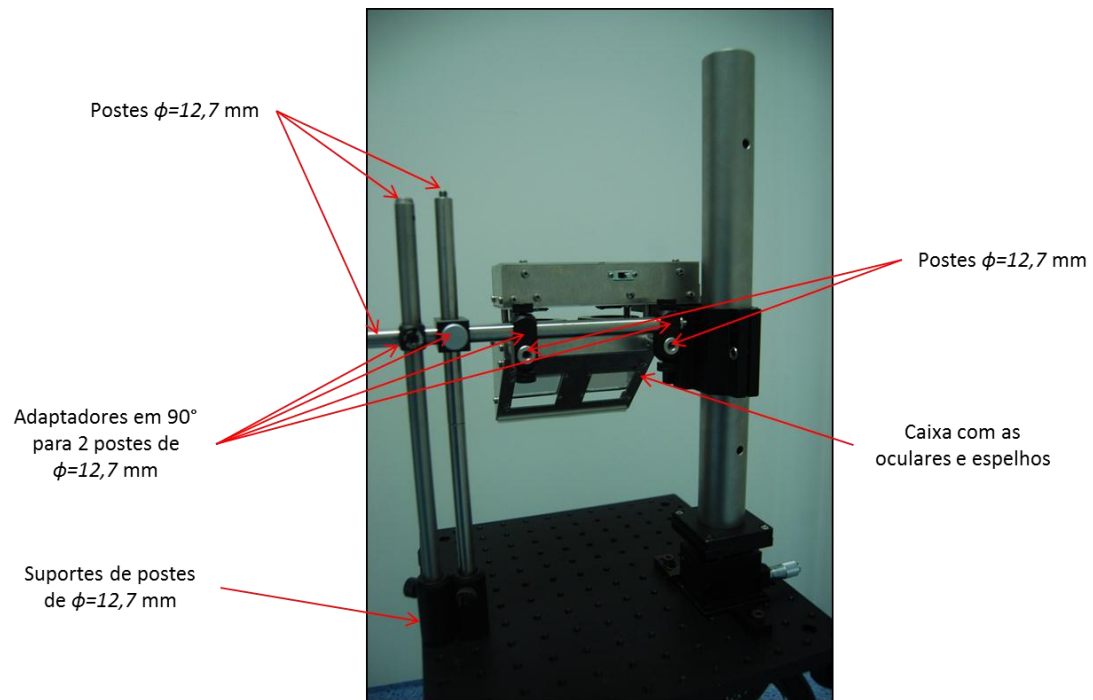


Figura 4.34 - Fotografia do sistema completo montado, evidenciando os vários elementos relacionados com o desenho óptico.

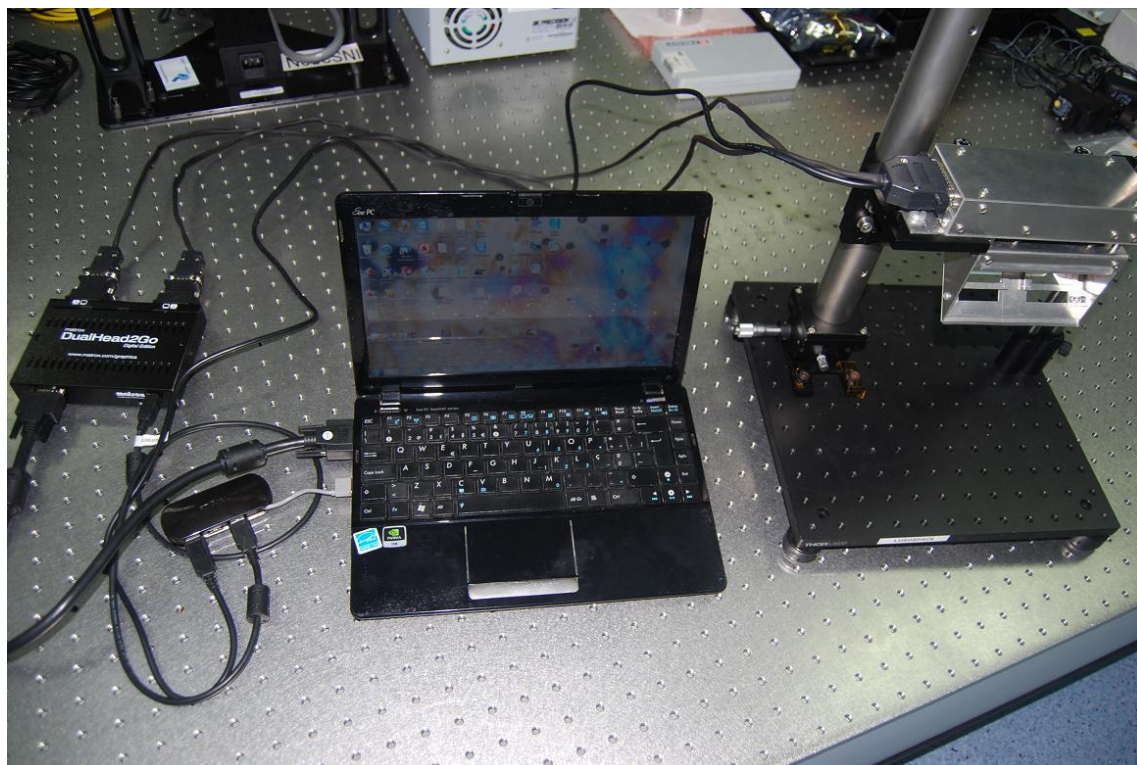


Figura 4.35 – Sistema completo com todas as ligações necessárias ao seu funcionamento.

4.5 Custos do Projecto

Tabela 4.6 – Custos do Projecto.

	Fabricante	Código	Preço / €	Quantidade
Desenho mecânico				
Folhas de alumínio 1,5 mm 12x100 cm	LeroyMerlin		12,25	2
Perfil canto alumínio 11,5x1,5 mm L = 1 m	LeroyMerlin		2,25	1
Mesa óptica alumínio 400x400 mm	ThorLabs	MB4545/M	274,05	1
Poste Ø12,7 mm, L = 40 mm	ThorLabs	TR40/M	4,32	1
Tubo para lente SM30, L = 1"	ThorLabs	SM30L10	24,36	2
Suporte de postes, L = 50,8 mm	ThorLabs	PH2/M	6,70	2
Poste Ø1,5", L = 350 mm	ThorLabs	P350/M	46,98	1
Suporte para poste Ø1,5"	ThorLabs	C1505/M	78,30	1
Estágio de translação vertical 60 mm x 60 mm	EdmundOptics	NT55-032	411,00	1
Poste Ø12,7 mm, L = 200 mm	ThorLabs	TR200/M	7,06	1
Poste Ø12,7 mm, L = 300 mm	ThorLabs	TR300/M	9,41	2
Adaptador ângulo recto	ThorLabs	RA90/M	8,25	4
Adaptador 30 mm para 2"	ThorLabs	SM2A11	19,14	2
Desenho óptico				
Ocular 28mm EFL RKE	EdmundOptics	NT66-211	59,38	2
Beam-splitter gama visível 50R/50T 25 x 38mm	EdmundOptics	NT47-023	104,50	2
Electrónica				
Controladores O5-Zif	TekGear		460,00	2
SVGA+ Rev 2 Color Microdisplay	eMagin	EMA-100080-01	570,00	2
Cabo Conversor de TTL 3,3 V para USB	FTDI	TTL-232R-3V3	20,79	1
DualHead2Go Digital Edition	Matrox	D2G-A2D-IF	185,00	1
Adaptador de DVI (macho) para HD15 (fêmea)	Matrox	ADP-DVI-AF	5,95	2
Cabo	RS	381-034	38,95	0,2
Mangueira termo-retráctil Ø1,6 mm L = 1 m	RadiPeças	MR1.6PR	0,90	1
Mangueira termo-retráctil Ø2,4 mm L = 1,2 m	RadiPeças	MR2.4PR	0,98	1
Mangueira termo-retráctil Ø6,4 mm L = 1,2 m	RadiPeças	MR6.4PR	0,98	2
Conector DB 25 macho	RadiPeças	2500	0,20	1
Conector DB25 fêmea	RadiPeças	2501	0,20	1
Conector HD15 fêmea	RadiPeças	3500	0,17	2
Capas para DB25	RadiPeças	2510	0,20	1
Capas para HD15	RadiPeças	910	0,20	2
Interruptor	RadiPeças	MS104	0,98	1

Serviços			
Mão-de-obra	Projecto	10	40
	Construção	10	80
	Montagem	10	16
	Teste	10	16
Total			5.140,08 €

Na Tabela 4.6 encontram-se os custos do material e serviços para o HMD construído.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão

Para estudar imagens estereoscópicas num HMD foram usados dois dispositivos. Os primeiros testes foram realizados no *Vuzix-Wrap 920AR*, disponível na *Lusospace*, que apresenta uma distância focal fixa. Este dispositivo serviu para estudar inicialmente o comportamento das imagens estereoscópicas e de outras pistas de profundidade como pistas monoscópicas e movimento (capítulo 5.1). O segundo dispositivo utilizado foi o protótipo concebido que permite a alteração do plano focal e que permitiu estudar a zona de conforto entre a distância de acomodação e a distância de convergência e o impacto na profundidade dos objectos virtuais quando sobrepostos em objectos reais.

5.1 Imagens 3D com plano focal fixo

Foram inicialmente realizados testes com um dispositivo de distância focal fixa, *Vuzix-Wrap 920AR* (Figura 4.35), este foi usado também como referência para a criação das imagens 3D. Este dispositivo exhibe o equivalente a um ecrã de 1,7 m de diagonal e aproximadamente a 3 metros de distância. Contém dois ecrãs com resoluções de 640x480 *pixels* [35]. Recorrendo à Eq. 3.1 e a estas especificações, pode-se calcular a paralaxe entre as imagens do olho esquerdo e direito em função da distância percebida, Figura 5.2. De notar que a distância percebida é em relação ao plano focal de 3 m, onde a paralaxe é nula. Objectos a menos de 3 m apresentam paralaxe negativa e objectos a mais de 3 m apresentam uma paralaxe positivo. Estes objectos não podem contudo ser comparados com objectos reais às mesmas distância pois as linhas de convergência do sistema óptico não são reguladas.



Figura 5.1 – Vuzix- Wrap 920AR [35].

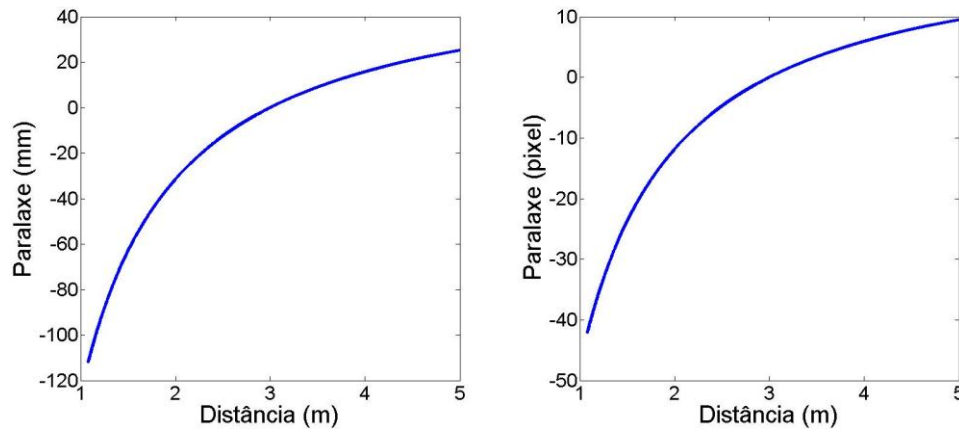


Figura 5.2 – Disparidade das imagens do olho direito e do olho esquerdo em função da distância. À esquerda a disparidade apresenta-se em mm e à direita em *pixels*.

Nos testes, realizados no *software Matlab*, desenharam-se objectos em fundo preto. Os objectos criados eram apenas figuras geométricas a 2D com o intuito de não fornecer mais nenhuma informação visual sobre a distância dos objectos a não ser a disparidade das imagens entre o olho esquerdo e o direito. Na Figura 5.3 e Figura 5.4 está um dos exemplo. Foram gerados três quadrados estáticos a profundidades diferentes, e como tal com disparidades diferentes. As distâncias escolhidas foram 2, 3 e 4 m para testar objectos antes, depois e em cima do ecrã. Os quadrados eram de diferentes cores e de tamanhos iguais. Na Figura 5.3 observa-se o resultado obtido para o olho esquerdo e direito e na Figura 5.4 sobrepôs-se as duas imagens para observar as diferenças.

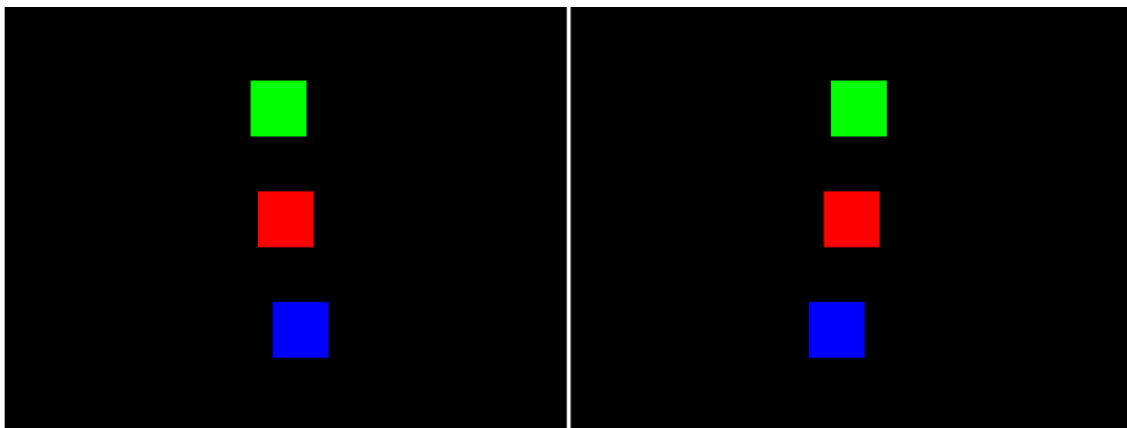


Figura 5.3 – Imagens do olho esquerdo e direito respectivamente. O quadrado verde apresenta uma disparidade correspondente a um objecto a 4 m, o vermelho a 3 m e o azul a 2 m.

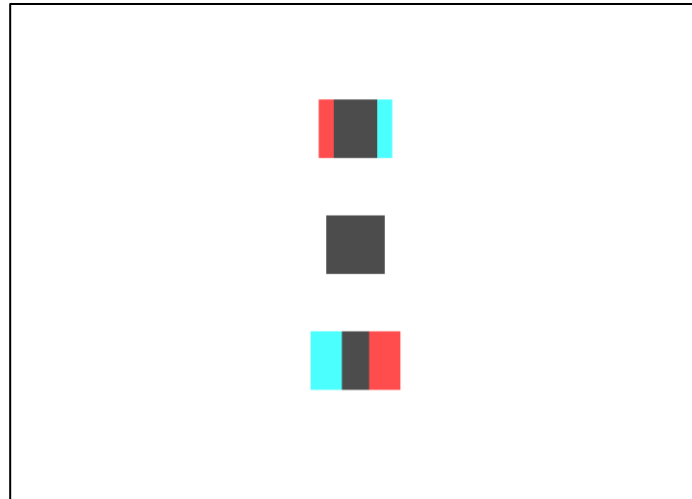


Figura 5.4 – Sobreposição das imagens do olho esquerdo e direito (de notar que o fundo foi alterado para branco nesta figura para uma melhor percepção).

É notória na imagem Figura 5.4 que o quadrado superior e inferior apresentam uma disparidade inversa, correspondendo a imagens à frente do ecrã com disparidade negativa (inferior) e imagens atrás do ecrã com disparidade positiva (superior). O quadrado central não apresenta qualquer disparidade pois encontra-se à distância do ecrã onde a paralaxe é nula.

Outros testes com o mesmo conceito foram realizados com diferentes formas, posições e distâncias. Estes testes mostraram um óptimo efeito 3D e conclui-se que é suficiente que para proporcionar uma boa sensação de profundidade entre os objectos.

Para gerar imagens com mais dicas sobre a profundidade dos objectos, como informações monoscópicas e movimento, recorreu-se a um programa de modelação 3D, o *Autodesk Maya*. Este programa permite colocar vários objectos a 3D e grava-los (*rendering*) a partir da perspectiva pretendida através de uma câmara de filmar virtual. Colocaram-se alguns objectos no espaço e fez-se o *rendering* com duas câmaras distanciadas 6,3 mm uma da outra (distância interpupilar). Pretende-se simular assim a perspectiva dos dois olhos para os objectos em causa.

Este *software* permitiu fazer uma série de experiências com objectos a 3D, onde se adicionou ao efeito de paralaxe novas dicas visuais sobre a profundidade dos objectos como a oclusão, perspectiva linear, luminosidade, sombras e textura. Na Figura 5.5 estão representados alguns exemplos dos testes efectuados. Observa-se que mesmo sem o efeito estéreo é clara a disposição dos objectos segundo a profundidade devido às pistas monoscópicas incluídas.

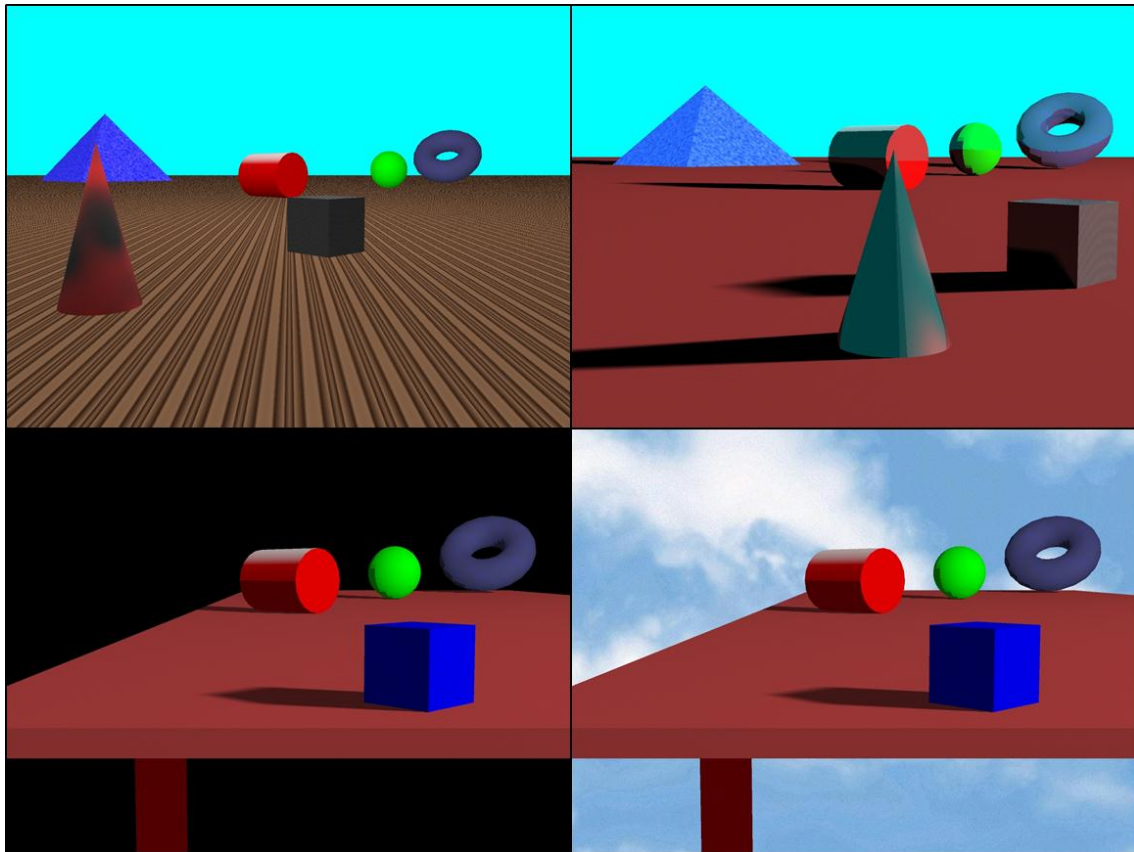


Figura 5.5 – Exemplos gerados no *software Autodesk Maya*.

Foram igualmente feitos testes com movimento. O objectivo era que as imagens se movessem nos três graus de liberdade existentes para observar o seu comportamento. Na Figura 5.6 encontra-se um dos exemplos criados: quatro objectos giram em torno do eixo vertical alterando a sua profundidade. O efeito que o movimento adicionado à visão estéreo é bastante impressionante.

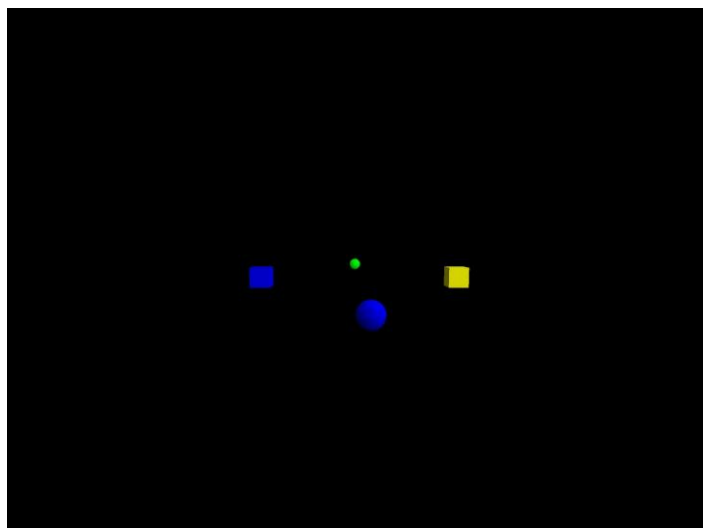


Figura 5.6 – Primeiro fotograma do exemplo gerado: os quatro objectos giram em torno do eixo vertical.

5.2 Imagens 3D com alteração do plano focal

Através do dispositivo concebido é possível fazer testes alterando o plano focal da imagem. Duas experiências foram feitas com o protótipo concebido: a primeira teve como objectivo o estudo da zona de conforto entre a distância de convergência e a distância de acomodação dos objectos virtuais (capítulo 5.2.1); na segunda pretendeu-se estudar o impacto na profundidade dos objectos virtuais quando sobrepostos em objectos reais (capítulo 5.2.2).

5.2.1 Zona de conforto entre a distância de convergência e a distância de acomodação

Método

O primeiro conjunto de testes realizado teve como intuito estudar a disparidade da convergência e acomodação, perceber os seus limites de fusão e conforto para o utilizador.

Participantes

Para esta experiência participaram 7 indivíduos, com idades compreendidas entre os 23 e 28 anos e com distâncias interpupilares entre 58 e 66 mm. Dois participantes usam correcção óptica diariamente e usaram-na também durante a experiência.

Procedimento

No início de cada experiência com um novo utilizador o sistema era calibrado para que as distâncias de convergência e acomodação de um objecto real e virtual coincidissem; colocou-se um alvo real a 1 metro de distância e um quadrado vermelho com paralaxe nula no

sistema; ajustando-se a inclinação dos espelhos foi possível alterar as linhas de convergência do objecto virtual até que a imagem virtual se sobrepõe com o alvo real; neste ponto as linhas de convergência de ambos os objectos coincidam. O plano focal do sistema óptico utilizado era de 1 m para que as linhas de acomodação do objecto virtual e real consistissem igualmente.

Uma série de imagens foram programadas em Matlab para o estudo recorrendo à Eq. 3.1. Estas imagens consistiam num quadrado vermelho com fundo preto. A série de imagens continha o mesmo quadrado com distâncias de convergência consecutivas entre os 200 e 6.000 mm. As imagens foram programadas para a distância interpupilar do participante.

Definiram-se 5 planos focais diferentes; 300, 500, 700, 1.000 e 2.000 mm. Os planos focais de 300 e 2.000 mm foram apenas testados em 4 dos participantes.

Para cada plano focal foi inicialmente apresentada uma imagem com a acomodação e convergência iguais. De seguida diminuiu-se a distância de convergência do objecto virtual em passos consecutivos até à distância em que a imagem se mantinha fundida, i.e., imediatamente antes de o utilizador sofrer de diplopia. Apesar da imagem se manter fundida, a esta distância origina grande desconforto ao utilizador. Para perceber qual a zona de conforto, a distância de convergência era de novo aumentada até o participante conseguir sentir-se confortável durante 30 s.

Resultados

A média dos participantes para a zona de diplopia e conforto está representada na Figura 5.7.

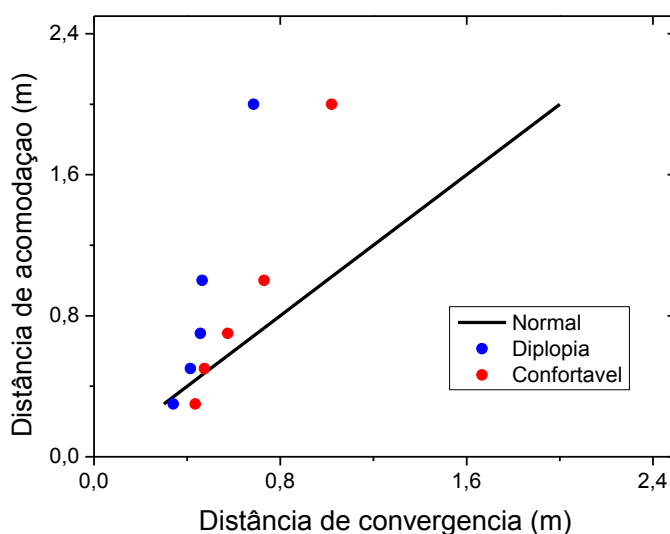


Figura 5.7 – Resultados obtidos da primeira experiência.

Efectuou-se um ajuste aos pontos da curva de conforto. A equação obtida foi a seguinte,

$$da = \frac{-1,1705 \times dc}{-1,6146 + dc} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Onde da e dc são as distâncias de acomodação e convergência respectivamente. Na Figura 5.8 encontra-se o resultado obtido.

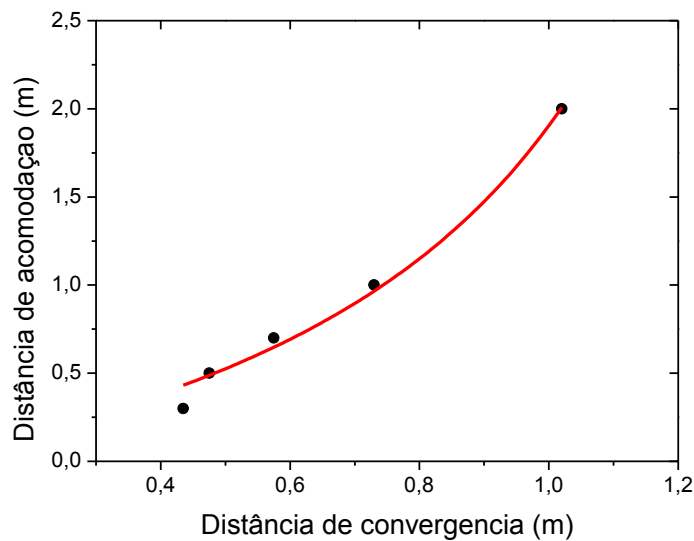


Figura 5.8 – Resultados obtidos para a zona de conforto, e curva de ajuste aos pontos.

5.2.2 Objectos virtuais sobrepostos em objectos reais

Método

Nos HMDs de realidade aumentada há estímulos virtuais e reais, questionando-se a existência de algum impacto na percepção de profundidade entre os objectos virtuais e reais. Nesta experiência pretende-se quantificar este impacto.

Participantes

Para esta experiência participaram 4 indivíduos, de idades compreendidas entre os 23 e 27 anos. O participante que usa correcção óptica diariamente usou-a também durante a experiência.

Procedimento

As séries de imagens usadas para esta experiência foram as mesmas que as usadas na primeira experiência, onde se mostrava um quadrado vermelho virtual com distâncias de convergência consecutivas.

Foram colocados alvos às distâncias de 300, 500, 700 e 1.000 mm, e para cada plano focal, alterava-se a distância de convergência da imagem no *software* até que a imagem virtual esteja sobreposta com o alvo real. A distância de convergência programada computacionalmente na imagem era registrada.

Resultados

Os resultados estão apresentados na Figura 5.9. Todos os gráficos apresentam no eixo y a diferença entre a distância de convergência programada computacionalmente e a distância do alvo real, e no eixo x a distância do alvo. Os gráficos a, b e c, apresentam os resultados individuais de cada observador, para os planos focais de, 300, 500 e 700 mm respectivamente. O gráfico d apresenta a média dos quatro observadores para cada plano focal.

Na Tabela 5.1 apresenta-se os valores médios do módulo da diferença entre a distância de convergência programada computacionalmente e a distância do alvo real para cada alvo.

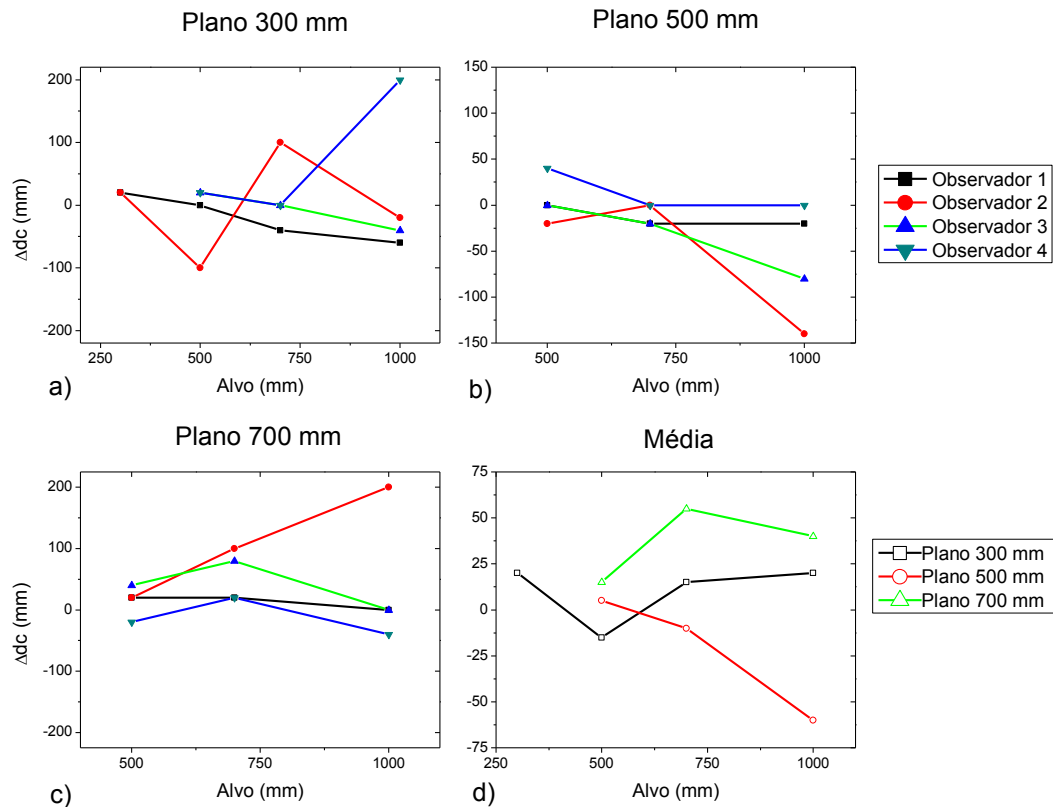


Figura 5.9 – Resultados obtidos na segunda experiência.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos na segunda experiência

Distância do alvo (mm)	Média da diferença de profundidade percepçionada entre o objecto virtual e real (mm)
500	11,67
700	26,67
1.000	40,00

5.3 Discussão de resultados

Em relação à primeira experiência, o ajuste feito na Figura 5.8 segue a tendência esperada. A expressão obtida para a zona de conforto entre distância de convergência e acomodação (em metros) é a seguinte:

$$da = \frac{-1,2 \times dc}{-1,6 + dc} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Comparando com os coeficientes reportados em [4], a incerteza obtida dos coeficientes P_1 e P_2 é de 0,2 e 0,1 respectivamente, concluindo-se assim que os resultados estão em concordância. Este limite é também muito próximo de uma disparidade entre a acomodação e convergência de 1°.

Os resultados apresentados referem-se apenas à zona de conforto quando a distância de convergência das imagens é menor que a distância de acomodação, i.e., paralaxe negativa, visto ser a zona mais problemática das imagens estereoscópicas. Apesar disso alguns testes foram feitos com imagens estereoscópicas com paralaxe positiva, onde rapidamente se observou que este efeito é bastante menos problemático. As imagens programadas computacionalmente usadas nos testes apresentavam uma distância de convergência até os 6 m. Os testes feitos mostraram que apenas para o plano focal de 500 e 300 mm é que os participantes não conseguiram fundir as imagens até 6 m, sofrendo diplopia por volta dos 1 e 3 m respectivamente. Caso se pretenda abranger todas as distâncias com paralaxe positiva e negativa, conclui-se que para fins práticos a paralaxe positiva não apresenta qualquer problema, visto que a quantidade de planos focais necessários para minimizar o desconforto para imagens com paralaxe negativa, abrange perfeitamente a zona de conforto das imagens com paralaxe positiva.

No caso do plano focal mais próximo utilizado, 300 mm, dois dos quatro participantes não conseguiram fundir as imagens à frente do plano focal, tornando a média apresentada maior que 300 mm. Isto pode-se dever ao facto da distância entre os dois sistemas ópticos monoculares não corresponder à distância interpupilar do participante. Ambos os participantes apresentavam distâncias interpupilares mais pequenas e por isso sofrem de diplopia mais rapidamente que pessoas com distâncias interpupilares maiores. No entanto, mesmo os outros dois participantes que conseguiram fundir as imagens com distâncias de convergência até aos 260 e 280 mm, quando expostos a imagens durante mais tempo apenas se conseguiram sentir confortáveis com imagens de distância de convergência de 320 e 400 mm respectivamente. O primeiro contava com uma distância interpupilar maior que o sistema, 66 mm, e segundo uma distância interpupilar igual ao sistema, 63 mm, estando assim em concordância com a ideia que uma distância interpupilar menor provoca diplopia nas imagens mais rapidamente. Contudo admite-se haver uma baixa representatividade dos resultados derivado ao número reduzido de participantes, sendo necessário um maior número para demonstrar uma maior credibilidade nos resultados obtidos.

Em relação á segunda experiência, os resultados dos vários participantes apresentaram uma diferença de percepção da profundidade entre o objecto virtual e real máxima de 200 mm, embora a média entre eles seja no máximo de 40 mm. Considera-se que seja necessário uma maior precisão (i.e., uma menor diferença na profundidade do objecto real e virtual percebida) para objectos mais próximos do que para mais longínquos. Na Tabela 5.1 podemos verificar este resultado que está em concordância com o esperado, visto que a média da diferença na profundidade do objecto real e virtual percebida diminui com a distância do alvo.

Nesta experiência duas questões do desenho mecânico do HMD desenvolvido poderão ter influenciado na percepção de profundidade entre os objectos reais e virtuais: A distância interpupilar fixa entre os dois sistemas monoscópicos; e a falta de controlo do ângulo de convergência dos dois sistemas monoscópicos. Só controlando com precisão estes dois parâmetros e alterando consoante as características do utilizador poderemos controlar com precisão as linhas de convergência do objecto virtual e torna-las consistentes com as linhas de convergência do objecto real.

Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas Futuras

O protótipo desenvolvido nesta dissertação conseguiu com sucesso, cumprir os objectivos inicialmente estabelecidos e os requisitos técnicos necessários de um HMD. Tentou-se tornar o protótipo tão flexível quanto possível para que se possa adaptar às exigências de futuros trabalhos. Ainda assim, poderá ser necessário efectuar alterações às especificações deste protótipo para complementar algumas lacunas não conhecidas / previstas.

A electrónica implementada e a interface desenvolvida cumpriu todos os requerimentos necessários à apresentação de imagens estereoscópicas no dispositivo desenvolvido.

No estudo feito entre a acomodação e a convergência é evidente a necessidade da alteração do plano focal de um HMD para a projecção de imagens estereoscópicas. Só com um sistema que tenha em consideração esta função é possível apresentar imagens estereoscópicas sem causar desconforto ao utilizador. Contudo não é necessário um grande número de planos focais; se considerarmos os dados obtidos da zona de conforto entre a distância de convergência e acomodação bastam apenas 8 planos focais diferentes para abranger distâncias de convergência entre os 0,4 e os 5 m através de imagens obtidas computacionalmente recorrendo ao efeito de paralaxe positivo e negativo. No protótipo desenvolvido a quantidade de planos focais é infinita, pois é alterado consoante a posição entre o ecrã e o conjunto óptico. Este método apresentou algumas desvantagens como a distorção das imagens para planos mais longínquos, o que poderá ter afectado a percepção de profundidade. Segundo [29] a distorção côncava provoca numa percepção de que as imagens estão mais próximas. Outra das desvantagens é a alteração do campo visual e da resolução das imagens quando se altera a distância do plano focal. Conclui-se assim que um dos melhoramentos a fazer no protótipo é o sistema óptico e a forma como este muda o plano focal. Uma das soluções é o uso de lentes birrefringentes como em [4], embora seja uma solução que obriga a um dispositivo de grandes dimensões. Para um desenho mais pequeno e optimizado a solução poderá passar por usar elementos ópticos holográficos (HOE).

Outra das questões a melhorar no sistema mecânico é a adaptação do sistema à distância interpupilar do utilizador. A distância entre os dois conjuntos monoscópicos e a distância interpupilar usada para a programação das imagens têm de estar ambas de acordo

com a distância interpupilar do participante para se obter uma perfeita percepção de profundidade.

No protótipo desenvolvido é possível alterar as linhas de convergência das imagens monoscópicas recorrendo à inclinação dos espelhos. Este sistema apesar de funcionar com alguma precisão não mede o ângulo de convergência da imagem. Este ponto seria também um dos melhoramentos a fazer. Para que as imagens virtuais convirjam no mesmo ponto que os objectos reais, o ângulo de convergência do sistema óptico é bastante importante e como tal o seu controlo e adaptação a cada participante seria fundamental para um sistema perfeito.

Uma das questões mais pertinentes nos resultados obtidos foi a dificuldade dos participantes fundirem as imagens com distâncias de convergência abaixo de 300 mm mesmo quando se colocava um plano focal de 300 mm. Considera-se que o sistema visual humano consegue convergir e acomodar-se a objectos reais até cerca de 200 mm sem dificuldade [1]. Pretende-se obter o mesmo resultado com objectos virtuais e tal não foi possível com o sistema concebido. Em [4] o plano focal mais baixo que utilizam é de 270 mm obtendo um limite médio para a distância de convergência de 240 mm. Este resultado está mais próximo do resultado pretendido. Os factores que poderão ter influenciado esta medição são mais uma vez a distância fixa entre os dois sistemas monoscópicos e a falta de controlo do ângulo de convergência dos mesmos. Este assunto necessita de um maior estudo mesmo com os melhoramentos a fazer no protótipo já descritos.

Este sistema serviu de desenvolvimento para um futuro dispositivo onde serão implementadas outras funções como rastreadores da posição do olho (*eye trackers*). Como só existe a necessidade de apresentar uma imagem perfeita na zona da fóvea tudo o resto pode estar pouco nítido. Se forem utilizados rastreadores da posição do olho que actuam sobre a posição dos ecrãs é possível visualizar com nitidez todo o campo de visão. Estes dispositivos permitem também saber o ponto de convergência e a distância interpupilar dos olhos podendo assim adaptar-se as imagens virtuais a essa informação.

Outras das implementações possíveis no âmbito do desenvolvimento de um dispositivo de realidade aumentada é um sistema de navegação que recorre a acelerómetros e câmaras para localizarem o utilizador no espaço e a inclinação da cabeça em qualquer um dos eixos.

A ligação à fonte de vídeo pode também ser optimizada. No protótipo concebido as imagens são fornecidas através de um computador por via de cabos. Num sistema óptimo

poderá ser utilizada a tecnologia *wireless* ou *bluetooth* para fazer a comunicação do dispositivo com a fonte de vídeo. A fonte de vídeo poderá ser um computador ou um *smartphone*.

Em relação ao controlo das imagens a serem projectadas pelo utilizador a solução óptima poderá passar por dispositivos de reconhecimento de voz e gestos, eliminado assim a necessidade de dispositivos físicos como ratos e teclados.

Bibliografia

- [1] J. E. Melzer e K. Moffitt, *Head-Mounted Displays: Designing for the User*, 1st ed. McGraw-Hill Professional, 1996.
- [2] W. Barfield e W. B. T. Caudell, *Fundamentals of Wearable Compu.* Routledge, 2001.
- [3] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, e M. S. Banks, «Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue», *J Vis*, vol 8, n 3, Mar 2008.
- [4] T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, e M. S. Banks, «The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays», *J Vis*, vol 11, n 8, Jul 2011.
- [5] M. Lambooij, M. Fortuin, I. Heynderickx, e W. IJsselstein, «Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review», *Journal of Imaging Science and Technology*, vol 53, n 3, pp 30201–1–30201–14, 2009.
- [6] R. R. Hainich e O. Bimber, *Displays: Fundamentals and Applications*, 1st ed. A K Peters/CRC Press, 2011.
- [7] «http://pt.wikipedia.org/wiki/Olho_humano». Mar-2013.
- [8] N. A. Dodgson, «Variation and extrema of human interpupillary distance», pp 36–46, Mai 2004.
- [9] H. Snellen, *Probekbuchstaben zur Bestimmung der Sehschärfe*. Van de Weijer, 1862.
- [10] M. Velger, *Helmet-Mounted Displays and Sights*. Artech House, 1998.
- [11] O. Cakmakci e J. Rolland, «Head-worn displays: a review», *Journal of Display Technology*, vol 2, n 3, pp 199 –216, Set 2006.
- [12] L. B. Rosenberg, «The effect of interocular distance upon operator performance using stereoscopic displays to perform virtual depth tasks», in *Proceedings of the 1993 IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, Washington, DC, USA, 1993, pp 27–32.
- [13] E. Hecht, *Optics*, 3 Sub. Addison Wesley Publishing Company, 1997.
- [14] D. Armitage, I. Underwood, e S.-T. Wu, *Introduction to Microdisplays*. John Wiley & Sons, 2006.
- [15] J. Rolland e O. Cakmakci, *The Past, Present, and Future of Head Mounted Display Designs*. .
- [16] B. Richter, U. Vogel, P. Wartenberg, K. Fehse, e R. Herold, «OLED-on-CMOS based bidirectional microdisplay for near-to-eye and sensor applications», in *Semiconductor Conference Dresden (SCD)*, 2011, 2011, pp 1 –3.
- [17] Michael J. Kidger, *Fundamental Optical Design*. 2001.
- [18] «United States Patent: 5696521 - Video headset», U.S. Patent 569652109-Dez-1997.
- [19] A. D. Yalcinkaya, H. Urey, D. Brown, T. Montague, e R. Sprague, «Two-axis electromagnetic microscanner for high resolution displays», *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 15, n 4, pp 786 –794, Ago 2006.
- [20] A. J.-A. Piao, B. M.-L. Piao, C. N. Kim, D. K.-Y. Lee, e E. S.-K. Gil, «Holographic optical element for wide field-of-view Head Mounted Display application using photopolymer», in *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, 2012 17th, 2012, pp 681 –682.
- [21] T. Shibata, «Head mounted display», *Displays*, vol 23, n 1–2, pp 57–64, Abr 2002.
- [22] W. Richards, «Stereopsis and stereoblindness», *Exp Brain Res*, vol 10, n 4, pp 380–388, 1970.
- [23] P. A. Howarth, «Potential hazards of viewing 3-D stereoscopic television, cinema and computer games: a review», *Ophthalmic Physiol Opt*, vol 31, n 2, pp 111–122, Mar 2011.
- [24] B. Wang e K. J. Ciuffreda, «Depth-of-focus of the human eye: theory and clinical implications», *Surv Ophthalmol*, vol 51, n 1, pp 75–85, Fev 2006.
- [25] Wopking, M., «Viewing comfort with stereoscopic pictures: An experimental study on the subjective effects of disparity magnitude and depth of focus», *Journal of the Society for Information Display*, vol 3, n Nr.3, pp 101–103, 1995.

- [26] K. Akeley, S. J. Watt, A. R. Girshick, e M. S. Banks, «A stereo display prototype with multiple focal distances», in *ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, New York, NY, USA, 2004, pp 804–813.
- [27] G. D. Love, D. M. Hoffman, P. J. W. Hands, J. Gao, A. K. Kirby, e M. S. Banks, «High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display», *Opt. Express*, vol 17, n 18, pp 15716–15725, Ago 2009.
- [28] K. Akeley, «Achieving near-correct focus cues using multiple image planes», Stanford University, Stanford, CA, USA, 2004.
- [29] J. P. Rolland, C. A. Burbeck, W. Gibson, e D. Ariely, «Towards Quantifying Depth and Size Perception in 3D Virtual Environments», University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 1993.
- [30] SVGA+ User Manual_REV9_Released, «<http://www.emagin.com/oled-microdisplays/>». 2005.
- [31] Tek Gear O5 v1a Datasheet rev0,2_2, «<http://tekgear.com/o5-zif.html>». Abr-2012.
- [32] en_dualhead2go_guide, «<http://www.matrox.com/graphics/en/products/gxm/dh2go/digital/>». Abr -2012.
- [33] TTL to USB Serial Converter Range of Cables Datasheet, «http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_TTL-232R_CABLES.pdf». Abr -2012.
- [34] Tek Gear O5 Control Interface v0,3,2 20090116_2, «<http://tekgear.com/o5-zif.html>». Abr -2012.
- [35] Wrap 920AR User Guide, «http://www.vuzix.com/support/downloads_drivers.html». Abr -2012.

Anexos

PIN-Out

Ligações entre o controlador e o conector DB25 macho.

<i>Esquerdo</i>			<i>Direito</i>		
Descrição	O5 ZIF	D-Sub 25	Descrição	O5 ZIF	D-Sub 25
CVBS	1	<Sem conexão>	CVBS	1	<Sem conexão>
CVBS Ground	2	<Sem conexão>	CVBS Ground	2	<Sem conexão>
VGA Ground	3	1	VGA Ground	3	13
VGA Red	4	2	VGA Red	4	12
VGA Green	5	3	VGA Green	5	11
VGA Blue	6	4	VGA Blue	6	10
VGA H-Sync	7	14	VGA H-Sync	7	25
VGA V-Sync	8	15	VGA V-Sync	8	24
Control Ground	9	16	Control Ground	9	23
Control 0/RX	10	17	Control 0/RX	10	22
Control 1/TX	11	18	Control 1/TX	11	21
Power Ground	12	5	Power Ground	12	9
Power Vin +5V	13	6	Power Vin +5V	13	8

Ligações entre o conector DB25 fêmea e os conectores DE-15

<i>Esquerdo</i>			<i>Direito</i>		
Descrição	D-Sub 25	VGA	Descrição	D-Sub 25	VGA
Red	2	1	Red	12	1
Green	3	2	Green	11	2
Blue	4	3	Blue	10	3
ID2	<Sem conexão>	4	ID2	<Sem conexão>	4
Gnd (H-Sync)	1	5	Gnd (H-Sync)	13	5
Red Gnd	1	6	Red Gnd	13	6
Green Gnd	1	7	Green Gnd	13	7
Blue Gnd	1	8	Blue Gnd	13	8
Key	<Sem conexão>	9	Key	<Sem conexão>	9
Gnd (V-Sync)	1	10	Gnd (V-Sync)	13	10
ID0	<Sem conexão>	11	ID0	<Sem conexão>	11
ID1	<Sem conexão>	12	ID1	<Sem conexão>	12
H-Sync	14	13	H-Sync	25	13
V-Sync	15	14	V-Sync	24	14
ID3	<Sem conexão>	15	ID3	<Sem conexão>	15

<i>Alimentação e Dados</i>		
Descrição	D-Sub 25	TTL-232R-3V3
<i>Gnd</i>	5, 9, 16, 23	1
<i>CTS#</i>	<Sem conexão>	2
<i>VCC</i>	6, 8	3
<i>TXD</i>	17, 22	4
<i>RXD</i>	18, 21	5
<i>RTS#</i>	<Sem conexão>	6

Desenho Técnicos

Nas páginas seguintes podem ser visualizados os desenhos técnicos de cada face das caixas concebidas e construídas. A caixa 1 representa a caixa que contém as micro-ecrãs e a electrónica respectiva ao seu funcionamento, e a caixa 2 representa a caixa que contém as oculares e os espelhos semitransparentes.